



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANTTI PÖNTINEN
LAASTIEN TOIMINTA KYLMISSÄ OLOSUHTEISSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Pentti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
15. toukokuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

PÖNTINEN, ANTTI: Laastien toiminta kylmissä olosuhteissa

Diplomityö, 65 sivua, 6 liitesivua

Toukokuu 2013

Pääaine: Talonrakennustekniikka

Tarkastaja: professori Matti Pentti

Avainsanat: Tutkimus, pakkaslaasti, talvimuuraus, rappaus, olosuhteet

Suomessa on jo pitkät perinteet talvella tehtävistä muuraus- ja rappauksista. Laastien jäätyminen voidaan estää esimerkiksi lisäaineiden avulla, laastin sekoitusveden lämmittämällä tai erilaisin suojaustoimenpitein. Näin voidaan mahdollistaa lujuuden kehittyminen myös talvityönä toteutettavissa kohteissa. Ongelmallisempi tilanne on syksyisin ja keväisin, jolloin vuorokautiset lämpötilanvaihtelut ovat suuria, mutta työtä ei suoriteta talviolosuhteisiin kehitetyillä pakkaslaasteilla tai talvimuurausmenetelmillä. Lämpötila voi yöllä laskea 0 °C:n alapuolelle, vaikka päivä olisi lämmin. Tästä voi seurata tuoreiden laastien jäätymisestä aiheutuvia vaurioita.

Diplomityö jakaantuu kahteen osaan: Kirjallisuustutkimusosassa perehdytään laastien koostumukseen ja sideaineiden kovettumisreaktioihin, käydään läpi aikaisempaa tutkimustietoa laastien toiminnasta kylmissä olosuhteissa sekä tutustutaan nykyisiin talvimuuraus- ja rappausohjeisiin. Kokeellisessa tutkimusosassa tarkastellaan TTY:n rakennustekniikan laitoksella toteutettuja laboratoriokokeita. Kokeiden avulla tutkittiin neljää pääasialla, eli lämpötilan vaikutusta muurauslaastin kovettumisnopeuteen, laastin jäätymisvesipitoisuuden vaikutusta tartuntalujuuteen, rappauslaastin kerrospaksuuden vaikutusta laastin jäätymiseen ja suolahärmeiden vaikutusta pinnoitteiden pysyvyyteen. Laboratoriokokeita varten kehitettiin pääasiassa uusia tutkimusmenetelmiä, koska standardimukaisia testaustapoja ei löydy useimpia kokeissa selvitettyjä asioita varten.

Tutkimuksesta saatujen tulosten mukaan laastin kovettumisreaktiot hidastuvat huomattavasti kylmissä lämpötiloissa. Nämä vaikutukset näkyvät selvästi jo lämpötilan laskiessa +10 °C:n tasolle. Viileässä laastin lopullinen lujuus ja tartunta muurauskappaleeseen voi kuitenkin kehittyä jopa lämpimässä kovettuneita laasteja suuremmaksi, pitkään säilyvän kosteuden takia. Nämä tulokset olivat yhdenmukaisia kirjallisuudesta löytyvien tutkimustulosten kanssa.

Rappauslaastin kerrospaksuus vaikutti laastin jäätymis- ja kuivumisnopeuteen, joka näkyi laastin lopullisessa lujuudessa. Jäätyminen aiheuttama lujuuskato ei kuitenkaan täysin noudattanut aikaisemmin laadittuja teorioita, joten vanhoja muurauslaasteille tehtyjä kokeita ei pystytty suoraan käyttämään nykyaikaisten rappauslaastien toimivuuden arvioimiseen. Tutkimukset sisälsivät myös pakkaslisäaineistetuille laasteille suoritettuja koesarjoja, joista aikaisempaa tutkimustietoa ei löytynyt.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

PÖNTINEN, ANTTI: Effects of cold temperatures in plasters and mortars

Master of Science Thesis, 65 pages, 6 Appendix pages

May 2013

Major: Construction Engineering

Examiner: Professor Matti Pentti

Keywords: Research, mortar, wintertime masonry, plaster, conditions

Wintertime masonry and plastering already have long traditions in Finland. The setting of mortar can be ensured by using frost preventing additives, heating the water used in the dry mortar mix or by various covering methods. Thusly, hardening can be assured even in projects executed during wintertime. The situation is more problematic during autumn and spring when temperatures vary largely within 24 hours. The problem occurs because masonry and plastering are typically done without the precautions mentioned above although air temperatures can suddenly fall. After a warm day, temperatures can still fall below 0 °C during the night-time. This can cause frost damages to normal mortars and plasters.

The thesis is divided into two parts. Earlier research reports and instructions for masonry and plastering in the wintertime, are explored in the literature study part. Compositions of dry-mix mortars and chemical reactions of binders are also explored. The second part of the thesis includes results of the research that was executed in the Department of Civil Engineering in TUT. The research was divided into four main topics: Setting time of mortar in different temperatures, effect of temporary freezing on adhesion of mortars with different water contents, effect of temporary freezing on plaster layers of various thickness and effect of salt crystallisation on the adhesion of the plaster's coating. There are no standardized testing methods related to this research, so research was executed mainly with new testing methods.

According to achieved results, setting of mortar takes much more time when temperature falls to +10 °C or below. However, the final compressive and adhesion strength of the mortar, set in cold temperatures, can still turn out to be even higher than in warm temperatures due to the longer lasting moisture within the mortar. These results were similar to the results found in older literature.

The thickness of the plaster layers affected the freezing and drying times of the plaster, which was later on reflected in the strength of the plaster. The weakened strength of the plaster due to the frost damages were not completely similar to the results of previous researches, so theories based on old results cannot be directly used for estimating effects of frost damages on modern plasters. The executed research of this thesis also included some experiments with mortars that had frost preventing additives added in the dry-mix. Results of similar experiments weren't found in the older literature.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen Teknillisen Yliopiston rakennustekniikan laitoksella, keväällä 2013. Diplomityötä varten suoritettiin laaja kokeellinen tutkimus laastien käyttäytymisestä kylmissä olosuhteissa. Tutkimukset toteutettiin yhteistyössä Saint-Gobain Weber Oy Ab:n kanssa.

Haluan kiittää diplomityöni ohjaajaa Jommi Suonketoa sekä ensimmäisestä kokouksesta asti mukana olleita Weberin kehitysjohtaja Helena Turtoa ja kehityspäällikkö Aila Alakuljua. Lisäksi kiitokset menevät Weberin laboratorioteknikolle, Merja Vallasmaalle, jolta sain laastikokeisiin liittyvää opastusta varsinkin tutkimusten alkuvaiheessa.

Rakennushallin työtehtävissä sain apua ja opastusta TTY:n käyttöinsinööri Tomi Stranderilta, laboratorioteknikko Kari Häyriseltä ja tutkija Toni Pakkalalta, joten kiitokset myös heille.

Tampereella 1.6.2013

Antti Pöntinen

SISÄLLYS

1	Johdanto	2
2	Laastit	4
2.1	Laastin ainesosat	4
2.1.1	Sideaine	4
2.1.2	Runkoaine	8
2.1.3	Vesi	9
2.1.4	Lisäaineet	9
2.2	Laastityypit	12
2.2.1	Kalkkilaastit	12
2.2.2	Sementtilaastit	12
2.2.3	Kalkkisementtilaastit	13
3	Laastit kylmissä olosuhteissa	14
3.1	Jään muodostuminen laastissa	14
3.2	Laastin lujuudenkehitys	15
3.3	Jäätymisestä aiheutuvat muodonmuutokset	17
3.4	Tartunta	18
3.5	Härmeet	19
4	Ohjeet	21
4.1	Talvimuuraus	21
4.2	Rappaustyöt talvella	22
5	Laastien toiminta kylmissä olosuhteissa – kokeellinen tutkimus	25
5.1	Tutkimuksen taustaa	25
5.2	Tutkimuksen tavoite	25
5.3	Tutkimuksen valmistelu	26
5.4	Tutkitut laastit	27
5.5	Laastien kovettumisnopeus eri lämpötiloissa	30
5.5.1	Kokeen kulku	30
5.5.2	Tulokset	31
5.5.3	Johtopäätökset	36
5.6	Laastin jäätymisvesipitoisuuden vaikutus tartuntalujuuteen	38
5.6.1	Kokeen kulku	39
5.6.2	Tulokset	41
5.6.3	Johtopäätökset	45
5.7	Laastin kerrospaksuuden vaikutus jäätymiseen	46
5.7.1	Kokeen kulku	46
5.7.2	Laastin kosteuspitoisuus ja jäätyminen	48
5.7.3	Tulokset	50
5.7.4	Johtopäätökset	53
5.8	Suolahärmeiden vaikutus pinnoitteiden pysyvyyteen	54

5.8.1	Kokeen kulku	54
5.8.2	Tulokset	60
5.8.3	Johtopäätökset.....	62
Lähteet.....		64
Liite 1. Laboratoriokokeiden tuloksia.....		66

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Kuivalaasti	Sideaineen, runkoaineen ja mahdollisten lisäaineiden seos, johon lisätään työmaalla vain vettä.
Sideaine	Sideaine toimii laastissa liima-aineena runkoainerakeiden välillä. Sideaineen kovettumisreaktiot aikaansaavat laastin lujuuden.
Hydraulinen sideaine	Sideaine joka kovettuu reagoidessaan veden kanssa. Tällaisia ovat esimerkiksi sementti ja hydraulinen kalkki.
Karbonatisoituminen	Laastin reagoimista ilman hiilidioksidin kanssa, joka on tyypillistä kalkkilaastien kovettumisreaktioissa. Alentaa sementtipitoisien laastien tai betonin emäksisyyttä.
Portlandsementti	Yleisin sementtilaatu, jota valmistetaan polttamalla kalkkikiven ja saven seosta. Ominaisuuksiin pystytään vaikuttamaan kemiallisella koostumuksella ja jauhamisasteella.
Lisäaine	Käytetään laasteissa haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Lisäaineilla voidaan parantaa esimerkiksi työstettävyyttä, pakkasenkestävyyttä, tartuntalujuutta ja vedenpidättävyyttä.
Pakkaslaasti	Talvitöihin suunniteltu laasti, jota pystytään käyttämään pakkasellakin. Sisältää usein nopeasti kovettuvaa portlandsementtiä ja veden jäätymispistettä alentavia lisäaineita.
Laastiprisma	Laastin lujuusominaisuuksien määrittämiseen käytettävä koekappale. Yleisesti käytetty koko on $40 * 40 * 160 \text{ mm}^3$.
Puristuslujuus	Muurauslaasteilta tyypillisesti määritettävä ominaisuus, jonka mukaan laastit voidaan luokitella. Puristuslujuuden yksikkönä käytetään N/mm^2 eli MPa.
Tartuntalujuus	Tärkeä ominaisuus sekä muuraus- että rappauslaastille. Sillä tarkoitetaan laastin kehittämää tartuntaa rappausalustaan tai muurauskappaleeseen. Tartuntalujuuden yksikkönä käytetään N/mm^2 eli MPa.
Taivutusvetolujuus	Määritetään taivuttamalla laastiprisma poikki keskikohdastaan. Määritetään usein samasta koekappaleesta puristuslujuuden kanssa. Taivutusvetolujuuden yksikkönä käytetään N/mm^2 eli MPa.
Valelujuus	Laastin jäätymisestä aiheutuva lujuus, joka on usein tuoreilla laasteilla oikeaa puristus- ja taivutusvetolujuutta suurempi. Häviää laastin sulaessa.
Alkalihärme	Vesiliukoinen alkalisuola kulkeutuu sementtipitoisten laastien pintaan ja muodostaa valkoisen kerroksen laastin kuivuessa. Poistuu usein itsestään sateiden ja tuulen vaikutuksesta.

Kalkkihärme	Ilman sisältämän hiilidioksidin reagoidessa sementin sisältämän kalsiumhydroksidin kanssa syntyy vesiliukoisia suoloja, jotka kulkeutuvat laastin pinnalle ja kiteytyvät kalkkikiveksi veden haihduttua. Vaatii poistamiseen tehokkaan vesihiekkapesun.
Talvimuuraus	Talviolosuhteiden katsotaan vallitsevan, kun lämpötila laskee ajoittainkin alle 0 °C. Tällöin muuraustyöt tulee suorittaa talvimuurausohjeiden mukaisesti.
Ilmamäärä	Tuoreilta laastimassoilta määritettävä ominaisuus, joka vaikuttaa laastin pakkasenkestävyyteen ja työstettävyyteen. Liian suuri ilmamäärä heikentää laastin lujuutta.
Notkeus	Tuoreen laastin työstettävyyteen liittyvä ominaisuus. Voidaan määrittää laastimassoilta iskupöytäkokeen avulla, mittaamalla laastikartion leviämä. Leviämän ohjearvot saadaan laastinvalmistajilta.
Jälkihoito	Muuraus- ja rappustöiden jälkeen suoritettavat toimenpiteet, joilla pidetään laasti riittävän kosteana vaaditun ajan. Tärkeää varsinkin sementtipitoisille laasteille. Voidaan toteuttaa esimerkiksi vesisumutuksella ja erilaisin suojaustoimenpitein.
Laastierä	Tässä diplomityössä laastierällä tarkoitetaan yhteen sekoitusastiaan mahtuvaa kuiva-aineksen ja veden seosta. Rinnakkaisiin koekappaleisiin käytettävät laastierät tehtiin samoilla ainesosien määrillä ja sekoitusajalla, jolloin laastierien ominaisuudet pysyivät samoina.
Termolanka	Lämpötilojen mittaamiseen tarkoitettu väline, joka koostuu lankamaisesta mitta-anturista ja lämpötiloja mittaavasta laitteesta.

1 JOHDANTO

Muuraus- ja rappauslaastien käyttäytyminen riippuu voimakkaasti rakennusvaiheessa vallitsevista olosuhteista. Laastin kuivuminen, kovettumisnopeus ja lopullinen lujuus vaihtelevat ilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden sekä esimerkiksi tuulen ja sateiden vaikutuksesta. Suomen ilmastolle tyypillisten neljän vuodenajan aikana sään vaihtelut ovat erittäin suuria, joten olosuhteiden vaikutukset laastien toimintaan on tärkeä tietää ja hallita.

Diplomityön alussa tutustutaan laastien koostumukseen, laastin yksittäisiin ainesosiin sekä kovettumisreaktioiden fysikaalisiin ja kemiallisiin tekijöihin. Laastin yksittäisillä ainesosilla on omat tehtävänsä sekä tuoreessa laastimassassa että kovettuneessa laastissa, ja laastiseoksen ominaisuudet riippuvat käytetyistä ainesosista ja niiden välisistä suhteista. Laasteihin liittyvän teorian tunteminen auttaa ymmärtämään myös kylmien olosuhteiden vaikutuksia paremmin

Suomessa käytettäviltä laasteilta vaaditaan hyvää pakkasenkestävyyttä, jos ne altistuvat sääolosuhteiden aiheuttamille rasituksille käyttökohteessaan. Laastin pakkasenkestävyys riippuu pääasiassa laastin lujuudesta, huokosjakaumasta ja vedenimuominaisuuksista. Laastien pakkasenkestävyyttä voidaan tutkia laastiprismojen avulla standardin: *SFS 5447 (Betoni, Säilyvyys, Jäädätyssulatuskestävyys)* - mukaisella jäädätyssulatuskokeella. Rappausrakenteita varten kehitetty ohjekirja *by57 (Eriste- ja levyrappaus 2011)* edellyttää pakkasenkestävyyden määrittämistä jokaisesta rakenteesta käytetystä laastista erikseen. Uusia eriste- ja levyrappausrakenteita ei siis hyväksytä käyttöön, ennen kuin rakenteen riittävä säänkestävyys on varmistettu. Kovettuneen laastin pakkasenkestävyyden tutkiminen on jo lähes arkipäivää ja se liittyy vahvasti nykyisten laastien laadunvalvonta- ja tuotekehitystutkimuksiin. Tässä diplomityössä ei kuitenkaan perehdytä tähän asiaan tarkemmin, vaan keskitytään työn aikaisiin olosuhteisiin ja siihen miten ne vaikuttavat tuoreisiin laastimassoihin ja valmiisiin rakenteisiin. Aiheet sivuavat toisiaan lähinnä laastin huokosjakauman osalta, sillä sopivalla huokosjakaumalla on todettu olevan vaikutusta sekä tuoreen että kovettuneen laastin pakkasenkestävyyteen. Tietenkin myös tuoreeseen laastin syntyvät vauriot vaikuttavat koko rakenteen pitkäaikaiskestävyyteen.

Tuoreiden laastien toimintaa kylmissä lämpötiloissa on tutkittu huomattavasti vähemmän kuin valmiiden rakenteiden pakkasenkestävyyttä. Kirjallisuudesta löytyvät tutkimustulokset painottuvat muurauslaasteille ja muutamalle erilaiselle muurauskappaleelle suoritettuihin koesarjoihin. Aikaisemmissa kokeissa on tutkittu kylmien olosuhteiden vaikutusta laastin ja muurauskappaleen väliseen tartuntaan, laastin ja muurin muodonmuutoksiin sekä laastin kovettumisnopeuteen ja lopulliseen lujuuteen. Lisäksi

niissä on tarkasteltu laastisauman vesipitoisuuden ja lämpötilan kehitystä, eri lämpötiloissa suoritettun muurauksen jälkeen. Kirjallisuudesta löytyvät tutkimustulokset ovat lähes poikkeuksesta vanhoja. Nykyisessä ohjeistuksessa esiintyvä laastien sallittu 6 %:n jäätymisvesipitoisuus perustuu Tenho Sneekin vuonna 1965 suorittamiin kokeisiin. Kokeet tehtiin muurauslaastilla ja niiden perusteella laasti ei laajentunut jäätyessään, kun laastin vesipitoisuus oli laskenut alle 6 %:n. Koetulokset löytyvät kokonaisuudessaan VTT:n julkaisusta: *Laastit talviolosuhteissa, 1965*. Uusimmatkin aiheeseen liittyvät koetulokset olivat 1980-luvulta, eli noin 30 vuoden takaa. Tämän jälkeen laastien tuotekehitys on ollut vilkasta, ja erilaisia laastilaatuja tulee jatkuvasti lisää. Uudet laastit voivat sisältää perinteisten ainesosien lisäksi esimerkiksi polymeerejä, erilaisia lisäaineita ja muovikuituja. Modernien laastien toiminta voi erota huomattavasti vanhojen muurauslaastien toiminnasta, joten vanhoja koetuloksia ei voida suoraan käyttää uusien laastien toimivuuden arvioimiseen. Diplomityön kirjallisuustutkimusosassa on esitelty vanhojen kokeiden tuloksia ja niistä tehtyjä johtopäätöksiä.

Suomessa on jo pitkät perinteet talvella toteutettavista muuraus- ja rappaustöistä. Muuraustyöt pystytään suorittamaan talvellakin vain vähäisin suojaustoimenpitein, käyttämällä talvitöihin kehitettyjä pakkaslaasteja tai lämmittämällä normaaliin laastiin sekoitettava vesi. Lämpötilan laskiessa ajoittainkin alle 0 °C:n tulee muuraustyöt kuitenkin suorittaa talvimuuraukseen kehitettyjen ohjeiden mukaan. Rappaustyöt tulee nykyisen ohjeistuksen mukaan suorittaa suojaamalla rakenne ja pitämällä työtila vähintään +5 °C:n lämpötilassa. Jos talviolosuhteisiin varaudutaan suunnittelussa ja työmaalla huolellisesti, ei se aiheuta esteitä muuraus- ja rappaustyön onnistumiselle. Nykyinen ohjeistus on esitelty diplomityössä talviolosuhteiden vaatimien toimenpiteiden osalta.

Talviolosuhteista ei aiheudu suuria ongelmia muuraus- ja rappaustöihin, mikäli niihin on varauduttu. Ongelmia ilmenee enemmän syksyisin ja keväisin, jolloin vuorokauden aikaiset lämpötilanvaihtelut ovat suuria, mutta töitä ei suoriteta talviolosuhteisiin kehitetyillä pakkaslaasteilla. Ilman lämpötila voi yöllä laskea alle 0 °C:n, vaikka päivä olisi lämmin. Tämä voi aiheuttaa normaaliin laastien jäätymisestä aiheutuvia vaurioita.

Diplomityötä varten suoritettiin omat laboratoriokokeet yhteistyössä Saint-Gobain Weber Oy Ab:n kanssa. Kokeissa tutkittiin laastien toimintaa kylmissä olosuhteissa ja niissä keskityttiin pääasiassa lyhyiden pakkasjaksojen vaikutusten tutkimiseen. Kokeiden tavoitteena oli, että tutkimustuloksia pystyttäisiin käyttämään työohjeiden kehittämiseen ja ennakoimattomien lämpötilanvaihteluiden aiheuttamien ongelmatilanteiden ratkaisemiseen. Laboratoriokokeissa käytettiin sekä muurauslaastia että kuituvahvistettua rappauslaastia. Laasteista tehtiin kokeita varten myös pakkaslisäaineistetut versiot, jonka käytöstä ei löytynyt vanhaa tutkimustietoa lainkaan. Pakkaslisäaineita on aikaisemmin tutkittu lähinnä laastinvalmistajien omissa tuotekehitys- ja laadunvalvontakokeissa. Kaikki laboratoriokokeissa käytetyt menetelmät ja tutkimustulokset on esitelty diplomityön jälkimmäisessä osassa.

2 LAASTIT

Laasti koostuu sideaineesta, runkoaineesta, erilaisista lisäaineista ja vedestä. Laastin ainesosat ja niiden sekoitussuhteet määräytyvät sen käyttötarkoituksen mukaan, eli min-kälaiset ominaisuudet halutaan tuoreelle laastimassalle ja valmiille rakenteelle. Aikaisemmin kaikki laastin ainesosat sekoitettiin keskenään vasta työmaalla, mutta nykyään tavallisesti työmaalla lisätään vain vesi tehtaalla valmiiksi sekoitettuihin kuivalaasteihin. Myös valmiin laastimassan, eli märkäläastin, toimittaminen työmaalle on mahdollista. Perinteisten muuraus-, kalkki-, sementti-, ja kalkkisementtilaastien rinnalle on kehitelty mm. erilaisia polymeerimodifioituja ja kuituvahvistettuja laasteja. [2] Erilaisen laastien lukumäärä on kasvanut niin suureksi, että tässä diplomityössä keskitytään pääasiassa yleisimpiin rappaus- ja muurauslaasteihin sekä niiden toimintaan kylmissä lämpötiloissa.

2.1 Laastin ainesosat

Seuraavassa tarkastellaan yksittäisiä laastin ainesosia sekä niiden tehtäviä tuoreessa laastissa, lujuudenkehityksen eri vaiheissa ja valmiissa rakenteessa.

2.1.1 Sideaine

Sideaineen ja veden seos toimii tuoreessa laastimassassa voiteluöljyn tavoin. Se asettuu liukukerroksena runkoainehiukkasten ympärille, vähentäen niiden välistä kitkaa ja siten vaikuttaen laastimassan notkeuteen. Voitelun teho vaihtelee sideainetyypistä riippuen, mutta yleisenä sääntönä pidetään, että mitä enemmän laastissa on sideainetta suhteessa runkoaineen määrään, sitä notkeampaa tuoreesta laastimassasta saadaan.

Sideaineen tärkein tehtävä on toimia liima-aineena runkoainerakeiden välillä ja aikaansaada laastille vaadittu lujuus sekä tartunta muurauskappaleeseen tai rappausalustaan. Liima-aine on lujuudeltaan ja kemialliselta kestävyydeltään runkoainetta heikompi sekä alttiimpaa tilavuudenmuutoksille, kuten kutistumiselle ja paisumiselle. Sideainetta ei saa olla laastissa liikaa, jotta kovettuneen laastin ominaisuuksista saadaan mahdollisimman hyvät. [1 s. 106]

Eri sideaineiden kovettumisreaktiot eroavat toisistaan esimerkiksi kovettumisnopeuden ja kovettumisen vaatimien olosuhteiden osalta. Osa sideaineista kovettuu ilman vaikutuksesta ja osa vaatii kovettuakseen riittävästi kosteutta. Kovettumisreaktiot tapahtuvat tyypillisesti hitaammin kylmissä lämpötiloissa ja kovettumisreaktioiden vaatimat minilämpötilat vaihtelevat eri sideaineiden välillä, joten sideaineella on suuri merkitys laastin käyttömahdollisuuksiin kylmissä olosuhteissa.

Kalkki

Kalkkia valmistetaan kalkkikivestä, joka on pääasiassa kalsiumkarbonaattia (CaCO_3). Kuumennettaessa siitä poistuu hiilidioksidi (CO_2) ja jäljelle jää kalsiummonoksidi (CaO), jota kutsutaan poltetuksi tai sammuttamattomaksi kalkiksi. Lisäämällä vettä oksidi muuttuu lämpöä kehittäen kalsiumhydroksidiksi (Ca(OH)_2). Veden lisäämistä kutsutaan myös kalkin sammuttamiseksi. [2 s. 24] Kalkkikivi on yksi maapallomme yleisimmistä kivilajeista ja kuvassa 2.1 on esitetty Suomessa sijaitseva kalkkilouhos. [7]



Kuva 2.1 Kalkkilouhos Paraisilla [7]

simmistä kivilajeista ja kuvassa 2.1 on esitetty Suomessa sijaitseva kalkkilouhos. [7]

Märkäsammutettua kalkkia saadaan lisäämällä huomattavasti enemmän vettä, mitä teoreettisesti tarvitaan pelkkään sammutusreaktioon. Näin sammutuksessa syntyy kalkkilietettä, jota seisotetaan vedellä täytetyssä astiassa, tai ns. kalkkihaudassa, tarvittava aika sammutuksen jälkeen.

Varastoinnin aikana liete muuttuu jäykähköksi massaksi siinä tapahtuvan jälkisammumisen ja veden erottumisen seurauksena. Kuivasammutettua kalkkia valmistetaan lisäämällä vettä vain hieman enemmän, kuin sammutusreaktio vaatii, jolloin reaktiotuotteena saadaan kuivaa ja hienojakoista jauhetta. [1 s. 107 - 108] Molempia kalkkilaatuja käytetään tyypillisesti rappauslaasteissa. Märkäsammutetusta kalkista valmistettua peruslaastia toimitetaan työmaalle märkälaastina ja kuivasammutettua kalkkia käytetään mm. kuivalaastien tuotannossa. [2 s. 24]

Kalkit voidaan jakaa kovettumistapansa perusteella ilmakalkkeihin ja hydraulisiin kalkkeihin. Kovettumistapaan pystytään vaikuttamaan valmistukseen käytettävillä kivilajeilla. Ilmakalkkien valmistukseen käytettäviä kivilajeja ovat puhtaat kalsiitti-, dolomiittinen kalsiitti- tai dolomiittikivi, ja hydraulisia ominaisuuksia omaavia kalkkeja saadaan polttamalla kvartsi-, savi- ja rautaoksidipitoista kalkkikiveä alle sintrautumislämpötilan. Hydraulisia ominaisuuksia aiheuttavat edellä mainitut luonnon omat epäpuhtaudet, tai kalkkiin voidaan lisätä latenttisesti hydraulisia aineita, kuten pozzolaaneja. [2 s. 24 - 25]

Ilmakalkit tarvitsevat nimensä mukaisesti ilmaa kovettuaakseen. Kovettuminen muodostuu kuivumiskovettumisesta ja sen jälkeisestä karbonatisoitumisesta. Kuivumisen jälkeen kalkin puristuslujuus on vielä alhainen, luokkaa 0,6 - 1,2 MPa. Karbonatinoituminen alkaa liuenneen kalsiumhydroksidin reagoimisella kostean ilman hiilidioksidin kanssa. Samalla haihtuu vettä ja kalsiumkarbonaattigeeli kiteytyy muodostaen uusia sidoksia laastiin. Toisessa vaiheessa hiilidioksidipitoinen vesi liuottaa kalsiumkarbonaattia olosuhteista riippuen. [2 s. 24] Laastin kuivuminen hidastuu lämpötilan

laskiessa ja karbonatisoituminen hidastuu huomattavasti jo lämpötiloissa $+5...6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lämpötilan laskiessa noin $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n tasolle karbonatisoituminen lakkaa käytännössä kokonaan. [1 s. 311]

Hydraulinen kalkki kovettuu osittain myös veden vaikutuksesta. Kovettumista voidaan verrata vähän sementtiä sisältävään kalkkisementtilaastiin, eli suuri osa kovettumisesta tapahtuu hitaasti kalkin karbonatisoitumisen seurauksena. [2 s. 25]

Sementti

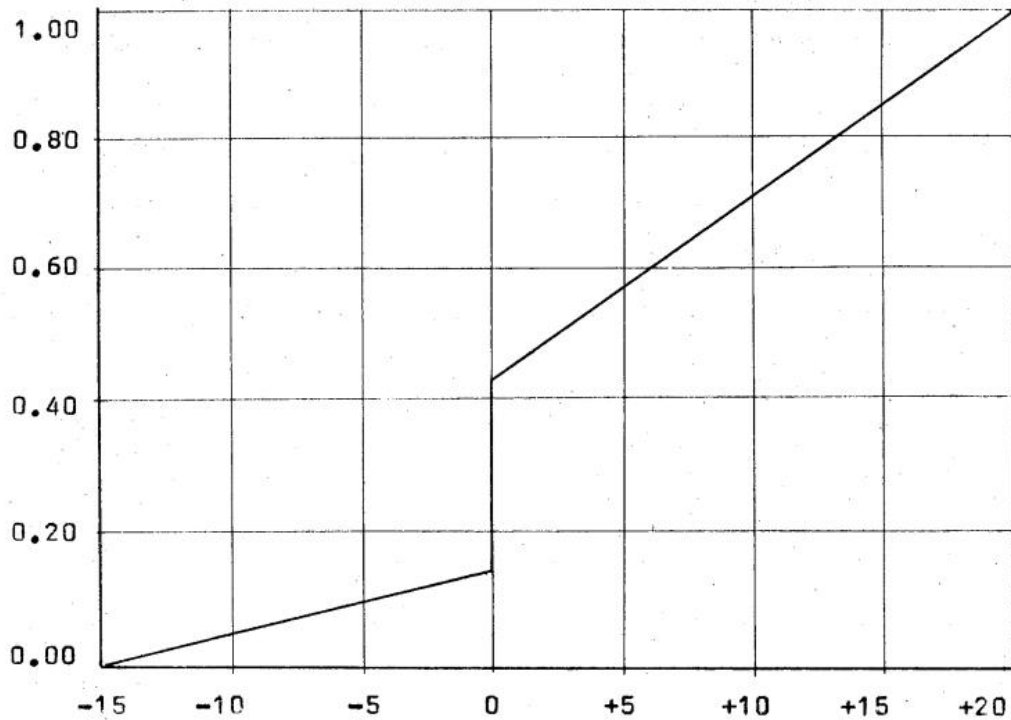
Sementti on voimakkaasti hydraulinen sideaine, joka pystyy kovettumaan vedessäkin. Tyypillisesti sementti koostuu portlandklinkkeristä ja seosaineista. Koostumuksen perusteella sementit voidaan jakaa viiteen päälajiin: portlandsementtiin, portlandseossementtiin, masuunikuonasementtiin, pozzolaanisementtiin ja seossementtiin. Päälajit voidaan jaotella edelleen yksittäisiin sementtilajeihin, käytetyn seosaineen ja seosainemäärien perusteella, mutta tässä diplomityössä ei käydä jokaista sementtilajia erikseen läpi niiden suuren lukumäärän takia. [3] Seuraavassa käsitellään yleisimmän, eli portlandsementin valmistusta ja kovettumisreaktioita.

Portlandsementtiä valmistetaan polttamalla kalkkikiven ja saven seosta kierto-uuneissa noin $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa. Polton aikana syntyy sementtiklinkkeriä, joka on kemialliselta koostumukseltaan pääasiassa erilaisia kalsiumsilikaatteja, kalsiumalumiinaatteja ja rautayhdisteitä, eli niin sanottuja sementtimineraaleja. Klinkkeri jauhetaan hienoksi jauheeksi ja samalla siihen lisätään pieniä määriä kipsiä säätelemään sementin sitoutumisaikaa. Kemiallisella koostumuksella ja jauhamisasteella voidaan vaikuttaa portlandsementin ominaisuuksiin, kuten kovettumisnopeuteen. [1 s. 109 – 111]

Sementti kovettuu sitomalla itseensä kemiallisesti vettä. Sementtimineraalit muuttuvat veden kanssa reagoidessaan hydraateiksi, jotka sitovat laastin runkoaineet kiinteäksi kappaleeksi. Hydratoitumisen ensimmäistä vaihetta kutsutaan sitoutumiseksi, jonka alkamisaika riippuu sementin ominaisuuksista ja mahdollisista lisäaineista. Hydratoitumisen toista vaihetta kutsutaan kovettumiseksi, jonka aikana aluminaatit sitovat itseensä vettä. Samalla alumiinia ja rautaa sisältävät sementtimineraalit sitovat vettä ja kalsiumhydroksidia. Portlandsementin päämineraalit, eli kalsiumsilikaatit, synnyttävät veden kanssa reagoidessaan dikalsiumsilikaattihydraatteja ja kalsiumhydroksidia, josta ainakin osa karbonatisoituu ajan mittaan. [1 s. 111] Sementin kovettumisreaktio on täysin riippuvainen veden saannista ja varsinkin kovettumisen ensimmäisten vuorokausien aikana sementtilaastit tulee pitää riittävän kosteina. [2 s. 26] Hydratoituminen voi toteutua täydellisesti vain tarpeeksi suurella vesi-sementtisuhteella. [14]

Sementin kovettumisreaktioiden tiedetään hidastuvan kylmissä lämpötiloissa, mutta reaktioiden vaatima minimilämpötila vaihtelee kirjallisuudessa hieman. Aikaisemmin minimilämpötilana pidettiin noin $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilaa [1 s. 311] ja tätä uudempien kokeiden perusteella reaktiot pysähtyvät kokonaan $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa. [15] Nykyaikaisiin pakkasmuurauslaasteihin kehittyä lujutta vielä $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassakin, joten kuvassa 2.2 esitettyä kuvaajaa voidaan pitää lähinnä suuntaa antavana. Asiaan

liittyen suoritettiin koesarjat diplomityötä varten ja tuloksia tarkastellaan kappaleessa 5.5.



Kuva 2.2 Sementin sitoutumisreaktioiden nopeus verrattuna +20 °C lämpötilassa tapahtuvaan sitoutumiseen. [7]

Muuraussementti

Muuraussementti koostuu portlandklinkkeristä, jauhetusta luonnonkivestä ja lisähuokoistusaineesta. Sopivia kivilajeja ovat mm. kalkkikivi, dolomiitti ja kvartsi. Muuraussementissä käytettävä klinkkeri on jauhettu hienommaksi kuin tavallisessa portlandsementissä, mutta muuten niiden valmistustavat ja kovettumisreaktiot ovat käytännössä samanlaiset. [1 s. 111 – 112]

Kipsi

Kipsiä valmistetaan kipsikiveä ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) varovasti polttamalla, jolloin saadaan poistettua noin 75 % sen sisältämästä kidevedestä. Näin poltettuna kipsikivestä syntyy hemihydraattia, joka reagoi nopeasti veden kanssa muuttuen takaisin alkuperäiseksi aineeksi eli dihydraatiksi. Reaktio alkaa niin nopeasti, että tyypillisesti tällaiseen kipsiin lisätään sitoutumista hidastavia lisäaineita. Polttamalla kipsikiveä voimakkaammin saadaan kidevesi poistettua kokonaan, jolloin jäljelle jäävää ainetta (CaSO_4) nimitetään polttoasteesta riippuen joko anhydridiksi tai estrichkipsiksi. Anhydridi reagoi myös veden kanssa muuttuen takaisin dihydridiksi, mutta reaktio on huomattavasti hitaampi. [1 s. 113]

Kipsilaasteja käytetään mm. sisätiloissa tehtäviin seinien, lattioiden ja kattojen tasoitus- ja pinnoitustöihin. Kipsin sitoutuminen ja kovettuminen vaativat ympäröiviltä olosuhteilta riittävän alhaista ilman suhteellista kosteutta sekä riittävän korkeaa lämpötilaa. [5 s. 12 - 15] Kipsilaastien käyttö on tyypillisesti rajattu yli +10 °C:n lämpötilaan, eikä niitä käsitellä tässä diplomityössä tarkemmin [6 s. 294].

Polymeerit

Polymeerejä käytetään yleensä toisena sideaineena sementin kanssa ja niillä pyritään parantamaan sementtilaastin ominaisuuksia, kuten työstettävyyttä, sitkeyttä, vedenpitävyyttä ja tartuntaa. [8] Polymeeripitoisuus vaihtelee tyypillisesti välillä 1...25 % sementin painosta. Kun pitoisuus on alle 5 %, polymeeri toimii lähinnä lisäaineen tavoin. [11 s. 9] Varsinkin laastin ja rappusalustan välinen tartunta paranee sementtilaastien polymeerimodifioinnilla, joten se on yleistä nykyaikaisissa rappauslaasteissa. Laastit joiden pääasiallisena sideaineena toimii erilaiset polymeerit, kuten silikonimodifioidut akrylaatit, kutsutaan orgaanisiksi laasteiksi tai liimalaasteiksi. Niitä käytetään ohutrappauksiin ja lämmöneristeiden kiinnittämiseen. [2 s. 14, 26]

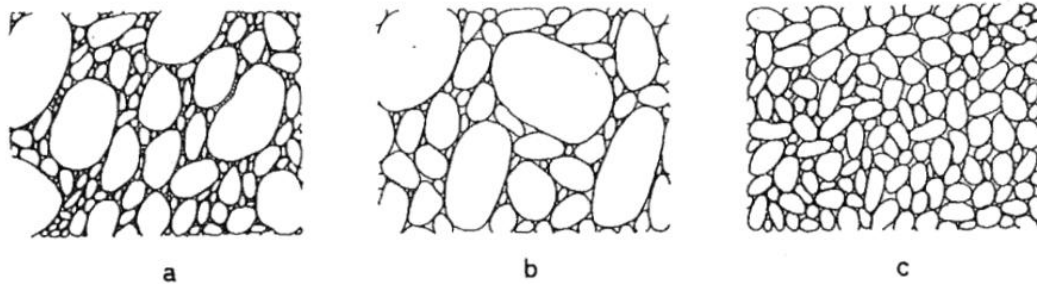
Yksittäiset polymeeripartikkelit sitoutuvat veden haihtuessa muodostaen yhteisen kalvon, joka toimii orgaanisena sideaineena liimaten runkoainesrakeita toisiinsa. [8] Kylmässä polymeerien kovettumisreaktiot hidastuvat tai kovettuminen voi lakata kokonaan. [11 s. 7] Polymeerimodifioituja sementtilaasteja pystytään kuitenkin käyttämään sementin lujuudenkehityksen vuoksi jopa -10 °C:n lämpötilassa. [12] Tämä edellyttää veden jäätymispistettä alentavia lisäaineita.

2.1.2 Runkoaine

Suurin osa laastin tilavuudesta on runkoainetta, joista yleisin on luonnonhiekkä. Hiekan raekokojakaumalla, eli rakeisuuskäyrällä, on suuri merkitys laastin ominaisuuksiin. Kiviaineksessa tulee olla eri raekokoja sopivassa suhteessa, jotta rakeet pakkautuvat mahdollisimman tiiviisti ja sideaineella täytettäviä tyhjätiloja jää mahdollisimman vähän. [2 s. 24] Suurin laasteissa käytetty raekoko on tavallisesti noin 4...5 mm, mutta esimerkiksi pintarappauslaasteissa se on vain 1...3 mm:n luokkaa. [1 s. 117] Luonnonhiekan rakeet ovat jääkauden pyöristämiä ja sileitä, joten ne sopivat muodoltaan hyvin laastin runkoaineeksi. Kiviaineksen sisältämän hienon aineksen, eli fillerin ($d \leq 0,075\text{mm}$), osuudella säädellään mm. laastin työstöominaisuuksia. Filleri vähentää tarvittavan sideaineen määrää ja parantaa laastin tartuntaa, mutta toisaalta lisää veden tarvetta ja kutistumaa. [2 s. 24] Laastiin käytettävä luonnonhiekkä ei saa sisältää haitallista määrää lietettä tai humusta. [9 s. 22]

Laastin runkoaineena voidaan käyttää myös murskattua kiviainesta, joka koostuu yleensä kalkkikivi-, kvartsi tai graniittimurskeesta. Murskauksella pyritään saamaan rakeet kuution muotoisiksi, jolloin ne pakkautuvat tiiviimmin kuin pitkulaiset. [2 s. 24] Kivimurskeen raekokojakauman tulisi olla samankaltainen kuin hyvällä laastihiekalla, joka aikaansaadaan seulomalla murske eri raekokoihin ja sekoittamalla uudestaan sopi-

vassa suhteessa. [1 s. 119] Rakeisuuskäyrän vaikutusta laastin laatuun on testattu ja koeket osoittivat selvästi, että huonosta tasarakeisesta hiekasta valmistetun laastin ominaisuudet heikkenivät käytettäessä samaa seossuhdetta ja sideainetta. Tasarakeisella hiekalla puristuslujuus jäi noin puoleen ja se läpäisi vettä sekä ilmaa enemmän kuin oikeanlaista runkoainetta sisältävä laasti. [1 s. 123]



Kuva 2.3 Hyvä raekoostumus (a) hiekka josta puuttuu filleri (b) ja huono tasarakeinen hiekka (c). [1 s. 116]

Erikoislaasteissa käytettäviä runkoaineita ovat mm. vermikuliitti ja perliitti, joilla saadaan lisättyä laastin palosuojaus- ja lämmöneristävyyssominaisuuksia. Koristeellisissa laasteissa voidaan käyttää marmoria, kiillettä tai kalsiittia. [1 s. 123]

2.1.3 Vesi

Vesi vaikuttaa tuoreen laastimassan työstettävyyssominaisuuksiin ja se osallistuu laastin kemiallisiin ja fysikaalisiin kovettumisprosesseihin. Laasteissa käytettävä vesi ei saa sisältää kovettumisreaktioita häiritseviä tai valmista rakennetta likaavia epäpuhtauksia. [1 s. 124]

Valmistajan ohjeiden mukaisella vesimäärällä saadaan vaaditut ominaisuudet tuoreelle laastimassalle ja valmiille rakenteelle. Vesimäärä vaikuttaa laastin lujuudenkehitykseen kylmissä lämpötiloissa ja siksi usein talvimuuraukseen suositellaan pienemmän vesimäärän käyttöä. Tätä asiaa on käsitelty tarkemmin kappaleessa 5.5.

2.1.4 Lisäaineet

Lisäaineilla pystytään vaikuttamaan tuoreen laastimassan sekä kovettuneen laastin ominaisuuksiin, kuten työstettävyyteen, kovettumisnopeuteen, tartuntaan, säänkestävyyteen, väriin ja laastin sisältämän veden jäätymispisteen alentamiseen. [1, 2]

Huokostimet

Lisähuokoistusaineilla parannetaan tuoreen laastimassan notkeutta ja kovettuneen laastin pakkasenkestävyyttä. [1 s. 126] Huokostimia käytettäessä tuoreen laastin ilmamäärä nousee, joten tulee pitää huolta että se pysyy valmistajan ilmoittamissa rajoissa. [2 s. 26] Huokostimien avulla laastiin syntyy lisää mikrohuokosia, jotka auttavat kovettunutta laastia pysymään ehjänä sen sisältämän veden jäättyessä. Ilmamäärän lisääntyessä laas-

tin lujuus kuitenkin heikkenee. Huokostimina käytetään yleensä rasvahappojen natrium-suoloja. [8 s. 81]

Hidastimet

Hidastimilla pidennetään laastien työstettävyyssäikää, tyypillisesti muutamista tunneista jopa kymmeneen tuntiin. Pitkillä hidastusajoilla plastisen halkeilun vaara kasvaa, jolloin veden haihtuminen tuoreesta laastista on estettävä. [2 s. 27] Hidastimien käyttö tulee kyseeseen työskenneltäessä korkeissa lämpötiloissa tai kuljetettaessa valmista laastimassaa pitkiä matkoja. [1 s. 126]

Kiihdyttimet

Kiihdyttimillä nopeutetaan laastin sitoutumista ja kovettumista, joka voi olla tarpeen esimerkiksi talvimuurauksessa. [1 s. 125]. Kiihdyttiminä käytetään mm. kalsiumformiaattia ja litiumkarbonaattia. [8 s. 81]

Tiivistävät ja hydrofobiset lisäaineet

Tiivistävillä ja hydrofobisilla lisäaineilla saadaan muutettua kovettuneen laastin vedenimuominaisuuksia siten, että laastista tulee vettä hylkivää ja kapillaarinen veden siirtyminen laastin sisäosiin vähenee tai estyy kokonaan. [2 s. 27] Hydrofobiset lisäaineet jättävät kuitenkin laastin huokokset avoimiksi, jolloin vesihöyryn diffuusio pääsee tapahtumaan. [1 s. 128] Tällaisina lisäaineina voidaan käyttää rasvahappojen metallisuoloja, kuten sinkkisteariittia ja natriumoleaattia. Metallisuolat huuhtoutuvat sateen mukana pois laastista vuosien kuluessa. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää hydrofobisia ominaisuuksia omaavia polymeerejä, jotka parantavat myös laastin tartuntaominaisuuksia. [8 s. 81]

Kuidut

Kuiduilla pyritään vähentämään tuoreen laastin plastisen vaiheen halkeilua ja parantamaan kovettuneen laastin vetolujuutta. Monet nykyaikaiset rappauslaastit ovat kuituvahvisteisia. [2 s. 27] Kuidut ovat tyypillisesti muovia tai alkalinkestävää lasikuitua. [8 s. 81] Harvinaisemmin käytetään myös hiilikuitua, jolla pystytään lisäämään rappauslaastin iskun- ja mekaanisen kulutuksen kestävyyttä. [13]

Pigmentit

Pigmenteillä saadaan aikaan värillisiä laasteja. Pigmentteinä käytetään yleensä erittäin hienjakoisia epäorgaanisia oksideja, jotka lisäävät laastin vedentarvetta ja kutistumaa. [2 s. 27]

Pakkaslisäaineet

Pakkaslisäaineen tarkoitus on alentaa veden jäätymispistettä, jotta tuoreet laastit eivät vaurioidu talvitöissä. Aikaisemmin on käytetty esimerkiksi kalsium- ja magnesiumklorideja, joiden haittavaikutuksia ovat laastin muuttuminen hygroskooppisemmaksi, lujuuden huonontuminen, suolojen erittyminen ja liittyvien metalliosien korroosiovaara. Jäätymispistettä saadaan alennettua näillä lisäaineilla noin 2...3 °C, joten hyöty on pieni haittavaikutuksiin verrattuna. [1 s. 128] Lisäämällä sekoitusveteen 5 % puhdasta alkoholia, saadaan jäätymispistettä alennettua noin 2 °C, ja 11 %:n alkoholimäärällä jäätympiste alenee noin 5 °C. Alkoholin aiheuttamat haitat kovettuneeseen laastiin ovat vähäisempiä kuin kalsium- ja magnesiumkloridilla, mutta sillä saavutetut hyödyt ovat pieniä nykyään käytettäviin lisäaineisiin verrattuna. [4 s. 62]

Uusimpia pakkaslaasteja voidaan käyttää -15 °C:n lämpötilaan asti, nopeasti kovettuvan portlandsementin ja veden jäätymispistettä alentavan lisäaineen avulla. Lujuudenkehitys on kylmissä lämpötiloissa hidasta, mutta se nopeutuu taas lämpötilan noustessa. Lopullinen lujuus ei jää merkittävästi lämpimässä kovettuneen laastin lujuutta alhaisemmaksi. Kylmien lämpötilojen vaikutuksista pakkaslisäaineistetun laastin lujuudenkehitykseen suoritettiin koesarjat, joiden tuloksia tarkastellaan kappaleessa 5.5. Haittavaikutuksena myös uudemmissa lisäaineissa on suolahärmeiden runsaampi esiintyminen muurattujen rakenteiden pinnalla. [6] Nykyisin käytettävien lisäaineiden tarkempaa koostumusta on vaikea selvittää, sillä laastien valmistajat eivät jaa näitä tietoja yrityksen ulkopuolelle.

Muut lisäaineet

Selluloosaeettereitä, eli erilaisia metyyli-selluloosa yhdisteitä, lisätään laastiin mm. työstettävyyden, vedenpidättävyyden ja viskositeetin lisäämiseksi. Varsinkin sementtipitoisissa laasteissa pitkään säilyvä kosteus on tärkeää kovettumisreaktioiden toteutumisiksi, jolloin laastilta vaaditaan hyvää vedenpidättävyyskykyä. Viskositeetin lisäämiseen voidaan käyttää myös tärkkelyseettereitä yhdessä selluloosaeettereiden kanssa. Selluloosaeetterit ovat laastiteollisuudessa yleisessä käytössä ja niiden vaikutus laastien ominaisuuksiin on suuri, vaikka niitä lisätään kuivalaastiin vain erittäin pieniä määriä, tavallisesti 0,02...0,7 % kuivalaastin kokonaispainosta. [8 s. 80 - 81]

2.2 Laastityypit

Laastin ominaisuudet riippuvat laastissa käytettävästä sideaineesta, runkoaineesta, lisäaineista ja niiden välisistä sekoitussuhteista. Yksittäisten ainesosien vaikutukset laastin ominaisuuksiin on käyty läpi kappaleessa 2.1. Seuraavassa on esitelty lyhyesti yleisimpiä laastityyppejä, niiden käyttökohteita ja kuivalaastien merkintätapaa.

2.2.1 Kalkkilaastit

Kalkkilaastin sideaineena toimii pelkästään ilma- tai hydraulinen kalkki. Kalkkilaastin kovettuminen tapahtuu hitaasti ilman hiilidioksidin vaikutuksesta ja lopullinen kovettuminen voi kestää jopa vuosia. [9 s. 17] Kovettumisen alussa kalkkilaasti kutistuu paljon, mutta laastin ollessa tällöin vielä melko plastista kutistumisen aiheuttaman halkeilun haitat jäävät vähäisiksi. Loppuvaiheen hitaan lujuudenkehityksen aikana kalkkilaasti ei kutistu enää käytännössä lainkaan. [1 s. 134 - 135]

1900-luvun alkupuolella Suomessa käytettiin muuraukseen ja rappaukseen pääasiassa puhtaita kalkkilaasteja. Nykyään niiden käyttö on vähentynyt ja kalkkilaasteja käytetään useimmiten vanhojen rakennusten korjaukseen ja entisöintiin. [6 s. 18]

Kalkkilaastien seossuhteen merkintä on muotoa K 100/900, joka tarkoittaa ilmakalkkasideaineista laastia jossa on 900 g runkoainetta 100 g sideainemäärää kohti. Hydrauliselle kalkille käytetään merkinnässä lyhennettä Kh. Usein ilmoitetaan myös runkoaineen raekokojakauma tai suurin käytetty raekoko. [6]

2.2.2 Sementtilaastit

Sementtilaastin sideaineena toimii joku kappaleessa 2.1.1 luetelluista sementtilajeista. Sementtilaasti sitoutuu nopeasti laastin sisältämän veden vaikutuksesta. Normaalin portlandsementin sitoutumisaika on noin 2...3 h. [9 s. 16] Sementtilaastin kutistuminen riippuu suurelta osin sen kuivumisnopeudesta, mutta tavallisesti siihen on jo kehittynyt lujuutta kutistumisen alkaessa. Tästä syystä kutistumishalkeamien syntymisvaara on suuri. Sementtilaastien huolellinen jälkihoito on tärkeää, varsinkin kovettumisen ensimmäisten vuorokausien aikana. Sementtilaasti kovettuu nopeasti ja saavuttaa suuren lujuuden, mutta haittapuolina ovat halkeiluriski, huono työstettävyys ja suuri vedenerotuminen. [1 s. 136]

Nykyään julkisivurappauksiin käytettävät sementtilaastit ovat usein polymeerimodifioituja. Niiden ominaisuuksia parannetaan myös erilaisten lisäaineiden ja kuitujen avulla, jotka vaikuttavat laastin pakkasenkestävyyteen, työstettävyys, vedenpidätyskykyyn ja tartuntaan. [2 s. 26] Tyypillisiä sementtisineaineisia rappauslaasteja ovat erilaiset liima- ja ohutrappauslaastit. Sementin käyttö laastiteollisuudessa on erittäin monipuolista ja sitä löytyy rappauslaastien lisäksi erilaisista muuraus-, ohutsauma-, saneeraus-, juotos- ja tasoituslaasteista, sekä talvitöihin kehitetyistä laasteista. [6]

Muuraussementti käyttäytyy muiden sementtilajien tavoin, mutta se ei ole yhtä altista kutistumisen aiheuttamalle halkeilulle. Muuraussementtiin on lisätty myös työstedävyttä parantavia lisäaineita. [9 s. 17]

2.2.3 Kalkkisementtilaastit

Kalkkisementtilaastien sideaineina käytetään ilmakalkkia ja sementtiä. Laastin lujuudenkehitykseen vaikuttaa siis molempien sideaineiden kovettumisreaktiot, nopea sementin hydratoituminen ja hidas kalkin karbonatisoituminen. Laastin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa kalkki- ja sementtimäärien suhdetta muuttamalla. Sementti parantaa laastin varhaislujuutta, loppulujuutta ja säänkestävyyttä, mutta heikentää laastin työstedävyttä ja lisää kutistumista. Sementin osuus tulee olla vähintään 35 painoprosenttia sideaineen kokonaismäärästä, jotta sementin lisäyksellä on laastin lujuutta parantava vaikutus. [2 s. 25]

Kalkkisementtilaasteja käytetään pääasiassa paksuissa rappauksissa tartunta-, täyttö- ja pintarappuslaasteina. Myös kalkkisementtilaasteihin voidaan lisätä polymeerejä, kuituja ja muita lisäaineita haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. [6]

Kalkkisementtilaastien seossuhteen merkintä on muotoa KS 50/50/600, jossa ensimmäinen numero kertoo kalkin, toinen numero sementin ja kolmas numero runkoaineen osuuden kuivalaastin kokonaispainosta. Myös suurin raekoko ja käytettävät lisäaineet ilmoitetaan tuoteselosteissa. [9 s. 16]

3 LAASTIT KYLMISSÄ OLOSUHTEISSA



Kuva 3.1 Jäädetyttyjä laastiprismoja.

Kylmissä olosuhteissa suurimmat ongelmat aiheutuvat laastin sisältämän veden jääytymisestä ja sideaineiden kovettumisreaktioiden hidastumisesta tai pysähtymisestä. Laasti ei toimi ikinä rakenteessa yksinäisenä osana, vaan yhdessä esimerkiksi muurauskappaleen tai rappausalustan kanssa. Syntyviä ongelmia eriteltäessä tulee siis muurattuja ja rapattuja rakenteita tarkastella kokonaisuutena.

Muurauskappaleet suojaavat osittain laastisaumaa nopealta jääytymiseltä ja niiden imu vähentää laastin vesipitoisuutta nopeasti, kun taas ohuen rappauslaastikerroksen suuri pinta on välittömästi yhteydessä kylmään ilmaan ja täten myös alttiimpi pakkasen aiheuttamille vaurioille. Muuraustöitä pystytään suorittamaan talvella melko vähäisin suojaustoimenpitein, mutta rappaukset edellyttävät nykyisen ohjeistuksen mukaan koko rakenteen suojaamisen ja rappauksen keinotekoisesti lämmittämisen vähintään $+5\text{ °C}$:n lämpötilaan. [1 s. 308 - 309] Ohjeet on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.

Tässä diplomityössä perehdytään työnaikaisten pakkasten aiheuttamiin ongelmiin ja erilaisiin tuoreen laastin vaurioihin, eikä laastien pitkäaikaiskestävyyteen kylmissä ilmastoissa. Aiheet liittyvät kuitenkin toisiinsa, sillä tuoreen laastin turmeltuminen vaikuttaa koko rakenteen kestävyyteen ja esimerkiksi laastin riittävällä suojahuokosten määrällä on vaikutusta sekä tuoreen että täysin kovettuneen laastin pakkasenkestävyyteen.

3.1 Jään muodostuminen laastissa

Vesi laajenee jäätyessään noin 9 % ja sen vaikutukset laastiin riippuvat siitä paljonko laastissa on huokostilavuutta, vapaata vettä, ja missä vaiheessa laastin kovettumisreaktiot ovat jäätymishetkellä. [17 s. 8] Vaikutukset ovat erilaisia täysin plastisessa laastimassassa ja jo lujuutta keränneessä laastissa, joten tapaukset on käsitelty erikseen.

Tutkimukset osoittavat, että veden jäätyminen laastissa tapahtuu samalla periaatteella kuin maalajeille tehdyissä kokeissa. Aineen suuriin huukosiin syntyy makroskooppisia jäälinsejä, jotka kasvavat vetämällä itseensä vettä läheisistä kapillaareista.

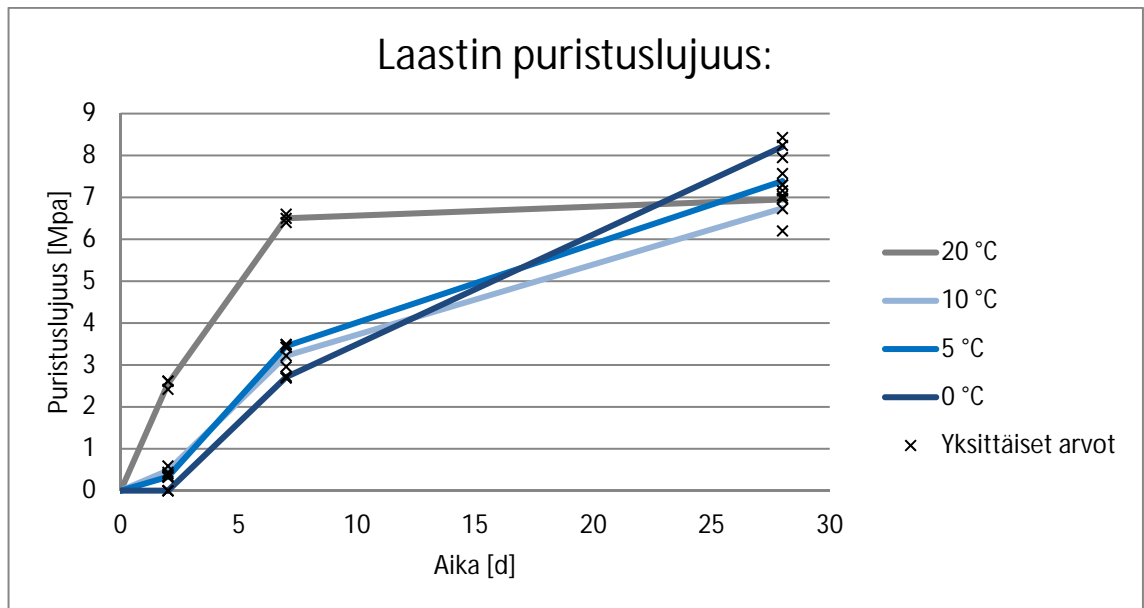
Makroskooppiset jäälinsit aiheuttavat aineen paisumista. Pienempiin huokosiin syntyy mikroskooppisia jääkiteitä, jotka vetävät samalla tavalla vettä itseensä. Jäälinsien tilavuuden kasvu puristaa kokoon kiteisiin kosketuksissa olevaa jäätyvätöntä vettä, joka aiheuttaa aineeseen hydraulista painetta. Jäälinsien muodostumismahdollisuudet riippuvat vapaan veden määrästä ja niitä syntyy herkästi esimerkiksi sementtilaastin ja kärkean kiviaineksen väliseen kosketuspintaan. Jos jäätyvä laasti on tietyn paineen alaisena, linsien muodostuminen on vähäisempää. Täysin plastiseen laastiin, jossa sideaineen sitoutuminen ei ole vielä alkanut, jäälinsien muodostuminen vaikuttaa lähinnä laastin huokosjakaumaan. Suurempien huokosten koko kasvaa ja pienten mikrohuokosten määrä vähenee. Jos laastin kovettumisreaktiot alkavat vasta laastin ja siihen syntyneiden jääkiteiden sulettua ei jäätyminen heikennä laastin lopullista lujuutta merkittävästi. [1 s. 309] Muurauslaastien vesipitoisuus alenee nopeasti tiilien imukyvyn ansiosta ja yläpuoliset tiilikerrokset aiheuttavat painetta laastisaumaan, joten jäälinsien syntyminen muurauslaastiin on harvinaisempaa. Mikäli jäätyminen tapahtuu nopeasti tai tiilien vedenimukyky on huono, syntyy muurauslaastin huokosiin tyypillisesti neulasen muotoisia jääkiteitä, jotka voivat laajetessaan aiheuttaa vaurioita laastiin. [1 s. 311]

Kun sideaineen kovettumisreaktiot ovat jo alkaneet, jäälinsien syntyminen laastissa on haitallisempaa. Mikäli laasti sisältää riittävästi vapaata vettä jäätyishetkellä, voi kasvava hydraulinen paine ylittää laastiin syntyneen sisäisen vetolujuuden. Pahimmillaan tästä syntyneet vauriot eivät palaudu laastin sulaessa, jolloin se vaikuttaa laastin lopulliseen lujuuteen. [1 s. 310] Kovettuneeseen laastiin ei synny vaurioita mikäli laastissa on riittävä huokostilavuus tai laastin vesipitoisuus on laskenut niin alhaiseksi, ettei laasti paisu jäätyessään. Jos jää pääsee vapaasti laajenemaan laastin tyhjiin huokosiin, ei hydraulinen paine nouse laastin sisäistä vetolujuutta suuremmaksi. [17 s. 9] Laasti ei laajene jäätyessään, jos sen vesipitoisuus on laskenut 6 %:n tasolle, joten tätä pidetään yleisesti sallittuna raja-arvona laastin jäätymisvesipitoisuudelle. [18]. Muurauslaastien riittävä esikovettumisaika on 2 d yli 0 °C:n lämpötilassa, jonka jälkeen sen sisäinen lujuus on niin suuri, ettei veden jäätyminen aiheuta siihen vaurioita. Myös laastin vesipitoisuus on tavallisesti tässä ajassa laskenut jo huomattavasti tiilien vedenimukyvyn ja sementin kovettumisreaktioiden takia. [17 s. 10]

3.2 Laastin lujuudenkehitys

Laastin sitoutumisreaktiot hidastuvat jo ilman lämpötilan laskiessa +10 °C:n tasolle. Kuvassa 3.2 on esitetty lämpötilan vaikutus nopeasti kovettuvaa portlandsementtiä sisältävän muurauslaastin lujuudenkehitykseen. Kuvaajista nähdään, että 7 d jälkeen +10 °C:n lämpötilassa laastin puristuslujuus on noin puolet +20 °C:n lämpötilassa kovettuneeseen laastiin verrattuna. Lämpötiloissa 0 °C, +5 °C ja +10 °C lujuudenkehitys on samankaltainen. 28 d jälkeen lämpötilassa 0 °C kovettuneen laastin puristuslujuus on kehittynyt kokeen laasteista suurimmaksi. Tämä voidaan selittää laastin huomattavasti hitaammalla kuivumisella, eli pitkään säilynyt kosteus vaikutti sementin kovettumisreaktioihin positiivisesti. Lujuus on laskettu kolmen rinnakkaisen koekappaleen keskiar-

vosta ja kuvaajiin on merkitty yksittäisten tulosten arvot kuvaamaan tulosten hajontaa. Koekappaleet on esitetty kuvassa 3.1 ja tutkimustulokset kokonaisuudessaan kappaleessa 5.5.



Kuva 3.2 Muurauslaastin lujuudenkehitys eri lämpötiloissa.

Ilmakalkkasideaineisen laastin kovettuminen alkaa laastin kuivumisella, jota seuraa karbonatisoituminen. Kuivuminen hidastuu lämpötilan laskiessa ja karbonatisoituminen tapahtuu erittäin hitaasti jo lämpötiloissa +5...6 °C. Lämpötilan laskiessa noin 0 °C:n tasolle karbonatisoituminen lakkaa käytännössä kokonaan. [1 s. 311]

Tutkimusten mukaan jäätyneiden laastien +20 °C:n lämpötilassa tapahtuvalla esikovettumisajalla on merkitystä laastin lopulliseen lujuuteen. Jos laasti jäätyy ennen kuin sitoutumisreaktiot ovat alkaneet, ei laasteihin synny jäätymisestä aiheutuvaa lujuuskatoa. Lujuuskatoa ei havaita myöskään yli 24 h esikovettumisajan jälkeen. Jos laasti pääsee jäätymään 7...24 h esikovettumisajan sisällä, paljon vettä sisältävän laastin taivutusvetolujuuksissa havaitaan selvää heikentymistä. Tällöin laastin sitoutumisreaktiot ovat päässeet alkuun, mutta laastin sisäinen lujuus on vielä liian pieni vastaanottamaan jäätymisestä aiheutuvaa hydraulista painetta. Taivutusvetolujuudet ovat 7...24 h esikovettumisajan sisällä jäädyttyä noin 75 % jäätymättömään laastiin verrattuna. Lujuuskato ei näy puristuslujuuksissa yhtä voimakkaasti. Jäätymisvesipitoisuuden ollessa alle 6,5 % lujuuskatoa ei synny esikovettumisajasta riippumatta, joten vaarallisen suuri vesipitoisuus jää muurauslaastiin vain erittäin hitaasti vettä imevillä muurauskappaleilla. [19]

Rappauslaastin jäätyminen vaikutuksista sen lopulliseen lujuuteen suoritettiin koesarjat diplomityötä varten. Eristerappauslevyjen annettiin esikovettua +20 °C:n lämpötilassa 4 h, jonka jälkeen niitä säilytettiin 24 h lämpötiloissa -2 °C, -5 °C tai -10 °C. Jäätymisvesipitoisuudet olivat jokaisessa koekappaleessa noin 12...13 %, eli huomattavasti korkeammat kuin yleisesti sallittu 6 %. Lämpötilassa -5 °C säilytetyn laastin lopul-

linen sisäinen vetolujuus oli noin 90 % jäätyttömään laastiin verrattuna, joten lujuuskato oli vain vähäistä. Lämpötilassa -10 °C säilytettyjen koekappaleiden lopullinen lujuus oli noin puolet referenssikappaleeseen verrattuna, joten tässä lämpötilassa lujuuskato oli merkittävä. Tarkemmin kokeen tulokset on käsitelty kappaleessa 5.7.

3.3 Jäätymisestä aiheutuvat muodonmuutokset

Laastin jäätymisestä johtuva tilavuuden kasvu aiheuttaa muodonmuutoksia talvella muurattuihin rakenteisiin. Tavallisesti tiilimuurissa on noin 20 % vaakasaumojen kokonaiskorkeudesta, joten muurin jäätymislaajenema on suurin pystysuunnassa. Tämä kuitenkin pääsee tapahtumaan vapaasti muuraustyön edetessä, joten pystysuuntaisesta laajenemisesta on harvoin haittaa. Ylimmän tiilirivin ja sen yläpuolisten rakenteiden väliin tulee jättää laajenemisen vaatima tila. Pystysaumojen muurin pituudesta vain noin 5 % ja laastin jäätymislaajenema on noin 1 %:n luokkaa, joten vaakasuuntainen muodonmuutos on jäätymisestä johtuen 0,5 %. Vaakasuuntainen muodonmuutos on niin pieni, ettei se oletettavasti vaikuta muuraustyön onnistumiseen. [17 s. 9]

Kesäolosuhteissa muurattaessa laastin lujuus kehittyy nopeasti, jolloin se pystyy vastaanottamaan muuraustyön edetessä kertyvää kuormitusta. Talviolosuhteissa laastin kovettumisreaktiot hidastuvat merkittävästi ja laastin varhainen lujuus muodostuu pääasiassa jäätymisestä aiheutuvasta valelujuudesta. Mikäli muuraustyöt jatkuvat pitkään pakkasolosuhteissa, voi laastisaumoille kertyä huomattavia kuormia sauman ollessa jäätyneenä. Kun laasti sulaa niin jäätymisestä aiheutuva valelujuus häviää ja kuormat siirtyvät äkillisesti laastin oman lujuuden varaan. Jos sulamisen jälkeinen laastin lujuus on valelujuutta pienempi, syntyy rakenteeseen painumia.

Sulamispainumia on tutkittu sulattamalla eri lämpötiloissa muurattuja, viiden tiilen korkuisia pilareita, joihin kohdistui pystysuuntainen 0,4 MN/m² suuruinen kuormitus. Kokeet suoritettiin muurauslaastilla M 100/600. Muurauslämpötilat olivat -7 °C, -12 °C ja -17 °C sekä kylmäsäilytysajat 1, 7 ja 28 d. Laasti jäätynyt kaikissa tilanteissa ennen sitoutumisreaktioiden alkamista ja sulatus tapahtui +20 °C:n lämpötilassa. Mitatut painumat olivat muurauslämpötilasta riippumatta suurimmat, kun pilarit sulatettiin yhden vuorokauden kylmäsäilytyksen jälkeen. Tällöin sulaneiden laastien lujuus koostui vielä pääasiassa runkoaineen kitkasta ja koheesiosta. Painumat olivat verrannollisia laastin jäätymishetken vesipitoisuuteen, eli hitaasti vettä imevien kalkkihiekkakivipilarien painumat olivat suurempia kuin poltettujen tiilikivipilarien painumat. Painumat johtuivat jäätyessä tapahtuneen laajenemisen palautumisesta ja kovettumattoman laastin painumasta. Jäätymisvesipitoisuuden ollessa alle 4 % ei painumia syntynyt. Lämpötilassa -12 °C muuratut pilarit painuivat 7 d kylmäsäilytyksen jälkeen 0,5...2,5 % käytetystä kivityypistä riippuen. Lämpötilassa -7 °C muuratut pilarit eivät painuneet saman kylmäsäilytysajan jälkeen enää lainkaan, joten sideaineiden kovettumisreaktioita tapahtui merkittävästi. Lämpötilassa -17 °C muurattujen pilareiden painumat olivat samaa luokkaa 1 ja 7 d jälkeen sulatettua, joten sideaineiden kovettumisreaktiot tapahtuivat tässä lämpötilassa erittäin hitaasti. [17 s. 21 - 25]

Muuratun rakenteen painumat ovat suurimmat, kun jäätyamisen jälkeen kertyy nopeasti lisää kuormaa ja sulaminen tapahtuu ennen kuin laastin kovettumisreaktiot ovat kunnolla alkaneet. Tasaisesti esiintyvistä painumista ei ole suurta haittaa muuratuille rakenteille, mutta käytännön kohteissa muodonmuutokset, lämpötilaerot, kuormien epäkeskisyydet ja työn epätarkkuus aiheuttavat painumien epätasaisuutta. Tämä voi aiheuttaa rakenteille taipumia, joiden tulee pysyä sallituissa rajoissa. Käytännössä kyseiset muodonmuutokset eivät esiinny täysimääräisinä, koska muuratut rakenteet ovat usein tuettuja. Kuorimuurit on tyypillisesti sidottu terässitein kantavaan runkoon tai täystiilitaloissa kuorimuurit on kiinnitetty toisiinsa. [4 s. 33 – 35] Epätasaisten painumien lisäksi myös muodonmuutosten aiheuttamat halkeamat voivat heikentää rakennetta. [17]

3.4 Tartunta

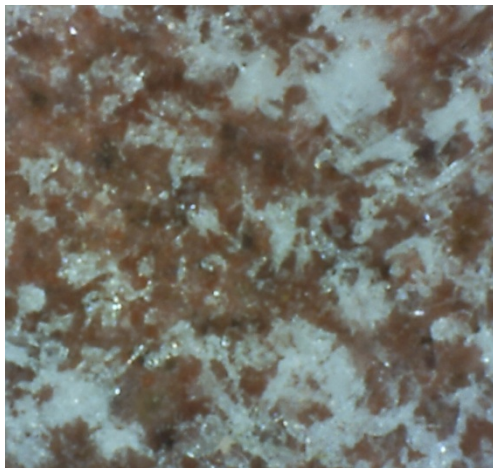
Rappaustöitä ei yleisesti suositella tehtäväksi ilman tai rapattavan rakenteen lämpötilan laskiessa alle $+5\text{ °C:n}$. Sideaineiden kovettumisreaktiot hidastuvat tätä kylmemmässä huomattavasti, joten myös tartunta laastin ja rappausalustan välille syntyy hitaasti. Hyvän tartunnan syntymiseksi sementtipitoisen rappauslaastin tulee pysyä riittävän pitkään kosteana, joka varmistetaan tarvittaessa erilaisin jälkihoitotoimenpitein. Pitkään säilyvä kosteus, hitaat sitoutumisreaktiot ja rappauspinnan suuri, säälle altis, pinta-ala tekevät tuoreesta rappauslaastista herkin pakkasen aiheuttamille vaurioille. [1]

Talvimuurauksen vaikutusta laastin ja muurauskappaleen väliseen tartuntaan on tutkittu ja tulokset ovat olleet hyviä. Oikealla laastin ja muurauskappaleen valinnalla saadaan talviolosuhteissa tartunta syntymään jopa lämpimällä muurattuja lujemmaksi. Kokeet suoritettiin muurauslaastilla M 100/600. Koesarjat suoritettiin kalkkihiekkakiville ja poltetuille muurauskiville siten, että neljän kiven korkuisia koepilareita säilytettiin ensin 7 d lämpötiloissa -7 °C , -12 °C tai -17 °C . Tämän jälkeen koepilareita säilytettiin vielä 28 d $+20\text{ °C:n}$ lämpötilassa ja tartuntalujuus mitattiin pilarin keskimmäisestä saumasta. Laastisaumat jäätivät siis ennen, kuin sideaineiden sitoutumisreaktiot olivat kunnolla alkaneet. Kalkkihiekkakivillä tartuntalujuudet jäivät joka lämpötilassa $4\text{...}10\text{ kN/m}^2$ tasolle, joka johtuu kalkkihiekkakivien huonommista tartuntaominaisuuksista. Parhaat tulokset saatiin poltetulle tiilikiville -12 °C:n lämpötilassa muurattaessa, jolloin laastin jäätymisvesipitoisuus oli $5\text{...}6\text{ %}$. Tartuntalujuus oli tällöin 80 kN/m^2 . Lämpötilassa -17 °C muurattujen pilarien laastisaumojen jäätymisvesipitoisuudet olivat suurempia kuin -12 °C muurattujen, joka vaikutti tartuntalujuutta heikentävästi. Poltetuilla tiilikivillä saatiin tässä lämpötilassa lopulliseksi tartuntalujuudeksi 46 kN/m^2 , joten korkeamman jäätymisvesipitoisuuden vaikutus näkyi selvästi. Lämpötilassa -7 °C muurattaessa, poltetut tiilikivet olivat vähentäneet laastin jäätymisvesipitoisuuden noin $3,5\text{ %:n}$ tasolle, ja tällöin lopullinen tartuntalujuus oli vain 25 kN/m^2 . Johtopäätöksenä tuloksista voidaan sanoa pitkään säilyvän kosteuden vaikuttavan positiivisesti tartuntalujuuksiin. Jäätymisvesipitoisuuden ollessa yli 6 % nämä vaikutukset kuitenkin pienenevät. Kappaleessa 3.1 mainittua yleisesti sallittua 6 %:n jäätymisvesipitoisuutta voidaan pitää myös tartuntakokeiden mukaan perusteltuna. [17 s. 28 - 30]

Tartuntalujuuteen vaikuttaa monipuolisesti laastin ja muurauskappaleiden ominaisuudet, kuten käytetty sideaine, lisäaineet, laastin vedenpidättävyyskyky, laastin vesipitoisuus, muurauskappaleiden vedenimuominaisuudet, kosteus ja pinnan ominaisuudet. Myös muuraustyön aikaiset olosuhteet ja rakenteiden jälkihoito vaikuttavat merkittävästi tartuntalujuuden kehittymiseen. Muurauskappaleiden tai rappausalustan pinnan ollessa jäässä voi jääkalvo estää täysin tartunnan syntymisen. Lisäksi se alentaa imukykyä ja nopeuttaa jäänmuodostusta laastissa. [10] Kylmien olosuhteiden vaikutuksista tartuntalujuuteen on olemassa tutkimustietoa erittäin vähän, muuraukseen käytettävien laastien ja muurauskappaleiden määrään verrattuna. Lyhyen pakkasjakson vaikutuksesta tuoreen laastin ja tiilen väliseen tartuntaan suoritettiin omat koesarjat, joiden tuloksia on käsitelty kappaleessa 5.6.

3.5 Härmeet

Sementti- ja kalkkisementtilaasteja käytettäessä saattaa rappauksen tai muuratun rakenteen pinnassa esiintyä materiaalien kuivumisesta johtuvaa vaaleaa härmettä. Härme voidaan jakaa vesiliukoiseen alkalihärmeeseen ja kalsiumkarbonaattia sisältävään kalkkihärmeeseen. Kylmän lämpötilan, suuren ilmankosteuden ja pakkaslisäaineen käytön tiedetään lisäävän härmeiden syntymistä.



Kuva 3.4 Mikroskooppikuva rappauslaastin pinnalle kiteytyneestä suolahärmeestä (suurennos 35x).

Alkalihärme on vesiliukoista, sementissä aina esiintyvää alkalisuolaa, joka muodostaa valkoisen kerroksen rakenteiden pintaan laastin kuivussa. Suurin osa alkalisuoloista peseytyy pois sateen ja tuulen vaikutuksesta ja loput voidaan tarvittaessa poistaa kevyellä harjauksella.

Kalkkihärme muodostuu muurattujen tai rapattujen rakenteiden pintaan ilman sisältämän hiilidioksidin reagoidessa sementin kalsiumhydroksidin kanssa. Reaktiossa syntyvät suolat ovat vesiliukoisia ja ne kiteytyvät rakenteiden pintaan kalkkikiveksi veden haihduttua. Kalkkihärme ei kiteydyttyään lähde pois pelkällä vesipesulla, vaan vaatii tehokkaan vesihiekkapesun. Tämä saattaa aiheuttaa rappauspinnan vaurioitumista.

Kalsiumhydroksidia kulkeutuu helposti rakenteiden pintaan kylmänä vuodenaikana, kun rakennusmateriaalit ovat märkiä ja kylmiä. Sementistä vapautuva kalsiumhydroksidi liukenee runsaaseen veteen ja kulkeutuu herkästi rakenteen kuivumisvyöhykkeelle. Rappauksissa esiintyvä härme ei ole aina peräisin rappauslaastista, vaan mikäli rappausalustassa on käytetty sementtiä tai sementtipitoista muurauslaastia, voi kalsiumhydroksidia liueta myös rappauksen alapuolisista rakenteista. Runsas härmeiden määrä voi olla merkki suuresta paikallisesta kosteusrasituksesta tai mahdollisesta kosteusvauriosta. Härmeiden esiintyminen on tyypillisempää uusissa seinärakenteissa, koska

silloin rakenne sisältää vielä runsaasti liukenematonta kalsiumhydroksidia ja vanhoissa rakenteissa kiteytyneet suolat ovat tukkineet huokosverkostoa. [2 s. 51 - 52]

Suolanmuodostuksessa rakenteen ja pinnoitteen väliin voi muodostua kiteytymispainetta, joka pahimmillaan vaurioittaa pinnoitteita. Rappauslaasteja ei tehdä pakkaslisäaineistettuina, koska sen pelätään lisäävän härmeen määrää ja vaikuttavan pinnoitteiden pysyvyyteen. Tätä asiaa tutkittiin diplomityötä varten suoritetuin laboratoriokeuin ja tulokset on esitetty kappaleessa 5.8.

4 OHJEET

Talvimuurauksen yleiset ohjeet löytyvät sekä standardista *SFS-EN 1996-2 (Eurokoodi 6: Muurattujen rakenteiden suunnittelu)* että *Suomen rakentamismääräyskokoelmasta (B8: Tiilirakenteet, ohjeet, 2007)*. Molemmat ohjeet perustuvat samaan standardiin, joten tässä diplomityössä ne on käsitelty yhtenä ohjeena kappaleessa 4.1. Talviolosuhteissa suoritettavat rappaukset voidaan tehdä *by46:n (Rappauskirja, 2005)* mukaan, jonka ohjeet on esitelty kappaleessa 4.2. Yleisten ohjeiden lisäksi laastien valmistajilta löytyy kattavat työohjeet kaikille markkinoilla oleville laasteille. Laastikohtaisia ohjeita tulee aina noudattaa, jotta tuoreen laastimassan ja valmiin rakenteen ominaisuuksista saadaan oikeat.

4.1 Talvimuuraus

Talviolosuhteiden katsotaan vallitsevan, kun ilman lämpötila ajoittainkin laskee alle 0 °C:n. Tällöin laastin valintaan, työn suoritukseen, rakennusaineiden säilytykseen ja rakenteiden suojaukseen kiinnitetään erityistä huomiota. Muurauskappaleet eivät saa olla märkiä, jäisiä tai lumisia. Tarvittaessa muurauskappaleet voidaan lämmitellä. Laastissa ei saa olla jäätä tai jäisiä ainesosia. Talvimuuraus voidaan suorittaa käyttäen talviolosuhteisiin suunniteltuja pakkaslaasteja tai normaaleja, lämmitettyjä laasteja, noudattaen talviolosuhteisiin soveltuvaa muuraustekniikkaa. [20]

Talvitöihin suunnitellut pakkaslaastit sisältävät normaalisti nopeasti kovettuvaa portlandsementtiä, veden jäätympistettä alentavia lisäaineita ja sitoutumisreaktioita kiihdyttäviä lisäaineita. [6] Pakkaslaasteilla pystytään tekemään muuraustöitä jopa -15 °C:n lämpötilaan asti, mutta laastinvalmistajan ohjeistamia käyttölämpötilarajoja ja suojaustoimenpiteitä tulee noudattaa. [20]

Talvimuuraus voidaan suorittaa myös normaaleilla muurauslaasteilla, käyttämällä lämmitettyä sekoitusvettä. Laastin lämmittämisessä tulee ottaa huomioon laastin tavallista nopeampi jäykistyminen. Sekoitusveden lämpötila ei saa ylittää +60 °C ja sekoitetun laastimassan lämpötila +40 °C. Laastisauman tulee pysyä riittävän kauan yli 0 °C:n lämpötilassa. Jos tätä ei pystytä varmistamaan pelkästään lämmitetyllä laastilla tai muurauskappaleilla, tulee koko rakenne suojata ja lämmitellä. Laastisauman tulee pysyä yli 0 °C:n lämpötilassa niin kauan, ettei veden jäätyminen aiheuta siihen vaurioita tai huononna laastin ja muurauskappaleen välistä tartuntaa. Tiilien imun tulee vähentää laastin vesipitoisuutta riittävän alhaiseksi tai laastiin tulee kehittyä riittävän suuri lujuus, ennen jäätymistä.

Muurauslaasteilla riittävän pieneksi jäätymisvesipitoisuudeksi voidaan katsoa 6 % laastin painosta. Sama raja-arvo sopii myös kalkkisementtilaasteille, joiden sideai-

neesta vähintään 65 painoprosenttia on portlandsementtiä. Veden imeytyminen laastista muurauskappaleisiin tulee määrittää kokeellisesti tai muulla luotettavalla tavalla. Rakenteen sulaessa muurin lujuudeksi saa olettaa enintään 40 % laskentalujuudesta.

Muurauslaasteilla ja sideaineesta vähintään 65 painoprosenttia portlandsementtiä sisältävillä kalkkisementtilaasteilla voidaan riittäväksi esikovettumisajaksi katsoa 2 d yli 0 °C:n lämpötilassa. Rakenteen sulaessa muurin lujuudeksi saa olettaa enintään 60 % laskentalujuudesta. Kaikille raudoitetuille muuratuille rakenteille käytetään samaa esikovettumisajan raja-arvoa.

Kevytbetonirakenteissa, eli kevytsorabetoni- ja höyrykarkaistuilla kevytbetoniharkoilla muurattaessa, laastien katsotaan saavuttaneen jäätymisen kannalta riittävän lujuuden kun ne ovat kovettuneet yli 0 °C:n lämpötilassa vähintään 3 d. Laastin lämpötilaa tulee seurata luotettavalla tavalla ja rakenteen sulaessa muurin lujuudeksi saa olettaa enintään 60 % laskentalujuudesta. [20]

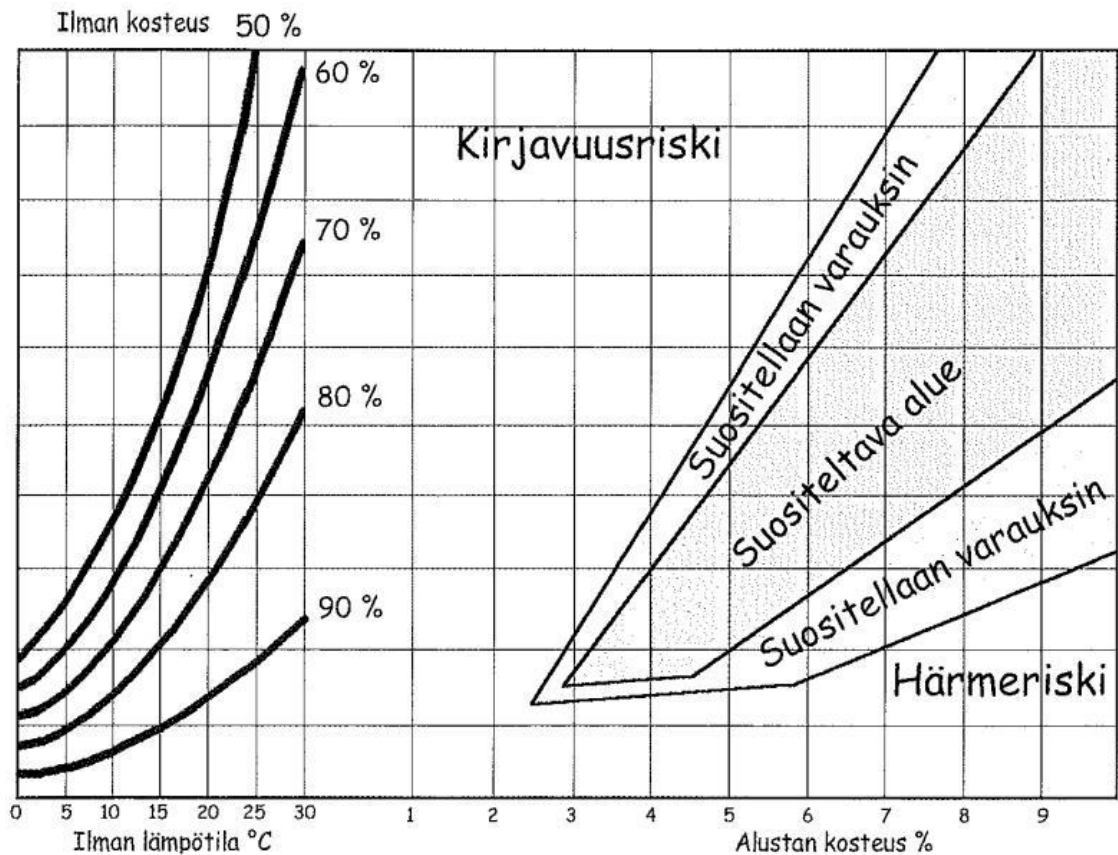
Talvimuurausohjeet sisältävät vain yleiset periaatteet talvimuurauksen onnistumiseksi. Materiaalien valinnat, käytetyt työmenetelmät sekä suojaukseen, lämmitykseen ja varastointiin liittyvät asiat tulee suunnitella aina tapauskohtaisesti. Laastien valmistajilla on olemassa ohjeita esimerkiksi laastin lämmitykseen liittyen, joista nähdään tarvittava sekoitusveden lämpötila käytetystä tiilistä ja työskentelyolosuhteista riippuen. [10 s. 22] Erilaisille laastien ja muurauskappaleiden yhdistelmille on suoritettu tutkimuksia sauman vesipitoisuuden ja lämpötilan kehittymisestä muurausyön jälkeen, joiden avulla pystytään määrittämään laastin jäätymisvesipitoisuus. [17 s. 14 - 21] Saatavilla olevaa tutkimustietoa on kuitenkin vain erittäin vähän.

4.2 Rappaustyöt talvella

Rappaustyöt suositellaan aina tehtäväksi sääsuojatuilta telineiltä, koska tämä helpottaa huomattavasti työn ja jälkihoidon aikaisten olosuhteiden hallintaa. Rappaustyöt edellyttävät sopivaa lämpötilaa ja ilmankosteutta, eli kylmien olosuhteiden lisäksi myös liian korkea lämpötila, tuuli ja suora auringonpaiste aiheuttavat ongelmia rappaustyön onnistumiselle. Rappaustyöt voidaan periaatteessa suorittaa *Rappauskirjan* (2005) ohjeiden mukaan vuodenajasta riippumatta, kunhan saadaan ylläpidettyä työn ja jälkihoidon vaatimat olosuhteet. Tässä diplomityössä ei ole käsitelty kaikkia kirjan sisältämiä vaatimuksia ja ohjeita, vaan keskitytään niihin asioihin joihin tulee kiinnittää erityistä huomiota kylmissä olosuhteissa.

Rapattavan rakenteen tai ilman lämpötila ei saa laskea alle +5 °C:n, joten talvella tämä edellyttää sääsuojattuja telineitä ja työtilan lämmittämistä. Rappausalusta tulee puhdistaa ja esikostuttaa, eikä se saa olla jäässä ennen rappaamista. Hydraulisia sideaineita sisältävät rappauslaastit tulee pitää riittävän kosteina vaaditun jälkihoitoajan, jotta vältytään plastiselta kutistumahalkeilulta ja varmistetaan laastin hyvä lujuudenkehitys ja tartunta. Tyypillinen aika on 1...3 d ja kostutus voidaan suorittaa vesisumutuksella. Tuoreet rapatut pinnat tulee kuitenkin suojata muista rakenteista valuvalla vedellä. Sääsuojien sisällä saattaa ilma liikkua niin sanotun hormivaikutuksen seurauksena, joka

lisää rappauksen kuivumisnopeutta. Tämä tulee huomioida ja yleensä sääsuojat pyritään suunnittelemaan siten, ettei hormivaikutusta syntyisi lainkaan. Matalissa lämpötiloissa ilmankosteus on korkea, varsinkin syksyllä, joka lisää härmeriskiä. Matalat lämpötilat voivat aiheuttaa myös kirjavuutta pintalaastin värissä. Materiaalivalmistajilta saa tuote-kohtaiset ohjeet laastin vaatimista työn ja jälkihoidon aikaisista lämpö- ja kosteusoloista. Kuvassa 4.1 on esitetty materiaalivalmistajan ohje, jolla voidaan vähentää rapattujen rakenteiden härme- ja kirjavuusriskiä.



Kuva 4.1 Materiaalivalmistajan ohje rappaukselle. [2 s. 52]

Kaikki rappauksessa tarvittavat materiaalit varastoidaan työmaalla säältä suojattuna, että ne pysyvät käyttökelpoisina riittävän pitkään. Kuivalaastisäkit eivät saa olla suoraan kosketuksessa maahan. Pitkäaikaisessa työmaavarastoinnissa tulee kuivalaasteille rakentaa lämmitettävä sääsuoja, jolla estetään laastien ominaisuuksien heikkeneminen ilman korkean kosteuspitoisuuden seurauksena. Esimerkiksi maalit ja muut vettä sisältävät materiaalit eivät saa jäätymistä kuljetuksen tai varastoinnin aikana, joten ne tulee talvella varastoida aina lämmitettyyn tilaan. Sementtipitoisiin laasteihin sekoitettavan veden lämpötilan tulee pysyä sellaisena, ettei side- ja lisäaineet vahingoitu. Sekoitusveden lämpötila ei saa ylittää +50 °C ja valmiin laastin lämpötila +40 °C. [2 s. 111 - 127]

Rappauslaastien alimmat käyttölämpötilat eroavat laastityypin mukaan. Mitä enemmän laastissa on sementtiä, sitä nopeammin se sietää jäätymistä. *Rappauskirjan* (2005) mukaan kalkkimenttilaastien alin käyttölämpötila on +5 °C ja kalkkilaastien

+10 °C. Kalkkirappaukset ja paljon kalkkia sisältävät kalkkisementtirappaukset tulee tehdä alkukesällä, jotta laastin karbonatisoitumiselle jää riittävästi aikaa ennen syyssateita ja talven aiheuttamaa jäätymistä. Kalkkilaasti ei sovellu talvitöihin erittäin hitaan lujuudenkehityksen vuoksi. [10 s. 23] Kaikkien rappausten näkyviin jäävä pintakerros suositellaan tehtäväksi henkilönostimella, ettei telineiden vaaka- ja pystytukien kohdat erotu pinnan struktuurin ja värin epätasaisuutena. Rappauksen viimeinen pinta on siis syytä tehdä olosuhteiden salliessa. [2 s.113]

5 LAASTIEN TOIMINTA KYLMISSÄ OLOSUHTEISSA – KOKEELLINEN TUTKIMUS

Diplomityötä varten suoritettiin kokeellinen tutkimus TTY:n rakennustekniikan laitoksen laboratoriotiloissa, yhteistyössä Saint-Gobain Weber Oy Ab:n kanssa. Samalla kehitettiin uusia laastien testausmenetelmiä ja niistä laadittiin kattava ohjeistus rakennustekniikan laitokselle. Ohjeet on koottu kandidaatintyöhöni: *Laastit kylmissä olosuhteissa, tutkimusmenetelmät ja -laitteet, 2012*. Pääasiat koemenetelmistä, laitteista ja koekappaleiden valmistuksesta on esitelty myös diplomityössä.

5.1 Tutkimuksen taustaa

Suomessa on jo pitkät perinteet talvella tehtävistä muuraus- ja rappauksista. Laastien jäätyminen voidaan estää lisäaineiden avulla ja lujuuden kehittyminen mahdollistaa myös talvityönä toteutettavissa kohteissa. Muita tapoja ovat laastin sekoitusveden lämmittäminen ja erilaiset suojaustoimenpiteet.

Ongelmallisempi tilanne on syksyisin ja keväisin, jolloin vuorokautiset lämpötilanmuutokset ovat suuria, mutta työtä ei suoriteta talviolosuhteisiin kehitetyillä pakkaslaasteilla. Lämpötila voi yöllä laskea 0 °C:n alapuolelle, vaikka päivä olisi lämmin. Jos tähän ei ole työmaalla varauduttu, voi normaaliin laastiin syntyä jäätymisestä aiheutuvia vaurioita.

Pakkaslaastien käyttäytyminen eroaa monin tavoin normaalien muuraus- ja rappauslaastien käyttäytymisestä. Laastikohtaisiin ohjeisiin on aina syytä tutustua ja noudattaa niitä, vaikka ne poikkeaisivat yleisistä muuraus- ja rappausohjeista. Pakkaslisäaineen käyttö rappauslaasteissa on harvinaista pintojen lisääntyneiden suolakertymien aiheuttamien tartuntaongelmien takia.

5.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää normaalien ja pakkaslisäaineistettujen muuraus- ja rappauslaastien ominaisuuksia ja niiden käyttäytymistä lämpötilan ja kosteuden funktiona. Koetulosten oli tarkoitus antaa lisää tietoa laastituotteiden toiminnasta talviolosuhteissa ja auttaa arvioimaan ennakoimattomien lämpötilavaihtelujen vaikutuksia valmiiden rakenteiden toimivuuteen. Tutkimuksen sisältö suunniteltiin tiiviissä yhteistyössä Saint-Gobain Weber Oy Ab:n tuotekehityksen kanssa, jotta tutkimustuloksia pystyttäisiin käyttämään myös työohjeissa ja ennakoimattomien pakkasten aiheuttamien ongelmatilanteiden ratkaisemisessa.

5.3 Tutkimuksen valmistelu

Ennen varsinaisten laboratoriokokeiden aloittamista tutustuttiin jo olemassa olevaan tutkimustietoon ja laasteihin liittyvään kirjallisuuteen. Kirjallisuudesta pyrittiin löytämään pääasiassa oman tutkimuksen aihealueeseen liittyvää tietoa, eli jäätyamisen aiheuttamista vaurioista ja kylmien olosuhteiden vaikutuksista tuoreisiin laasteihin. Lisäksi perehdyttiin laastin yksittäisiin ainesosiin ja niiden tehtäviin sekä sideaineiden kovettumisreaktioiden kemiallisiin ja fysikaalisiin tekijöihin, jotta pystyttäisiin paremmin ymmärtämään laastien toimintaa kylmissä olosuhteissa. Kirjallisuudesta löytyvät tiedot ja tutkimustulokset on esitetty diplomityön kappaleissa 2 - 4.

Ennen laboratoriokokeita tutustuttiin myös Saint-Gobain Weber Oy Ab:n omiin laadunvalvontakokeisiin ja laastien testaukseen liittyviin standardeihin. Diplomityön laastikokeita varten kehitettiin pääasiassa uusia testausmenetelmiä, sillä standardinmukaisia testaustapoja ei löytynyt tutkimuksessa selvitettyjä asioita varten. Laastin lujuudenkehitys kylmissä lämpötiloissa tutkittiin kuitenkin standardin: *SFS-EN 1015-11 (Muurauslaastein testimenetelmiä. Osa 11: Kovettuneen laastin taivutus- ja puristuslujuuden määrittäminen)* - mukaisilla laastiprismoilla ja kuormituskokeilla. Koemenetelmiä kehitettiin suorittamalla alustavat koesarjat ja tekemällä niihin tarvittavat parannukset, ennen virallisia kokeita. Muutoksista sovittiin aina Weberin tuotekehityksen edustajien kanssa tutkimukseen liittyvissä kokouksissa.

Weber toimitti kaikki tarvittavat materiaalit TTY:n rakennustekniikan laitoksen laboratoriotiloihin ja antoi ohjeavot tuoreiden laastimassojen ominaisuuksista. Laastien vesimäärä, ilmamäärä ja notkeus tuli saada sekoituksen jälkeen ohjearvojen mukaisiksi, jotta kokeissa käytettävät laastit vastaisivat mahdollisimman hyvin työmaalla käytettäviä laasteja. Tuoreista laasteista määritettiin myös ominaispaino.

Laastin sekoitus tehtiin kuvan 5.1 mukaisella *Hobart* - piensekoittajalla, jollaista käytetään myös laastinvalmistajan omissa tuotekehitys- ja laadunvalvontakokeissa. Jokaisesta kokeesta käytetystä laastista sekoitettiin aluksi harjoituseriä, joista mitattiin edellä mainitut tuoreen laastin ominaisuudet. Laastiin sekoitetun kuiva-aineksen ja veden painot mitattiin tarkalla vaa'alla ja sekoitusaikaa tarkasteltiin sekuntikellolla. Harjoituserien avulla löydettiin sellaiset veden määrät, kuiva-aineksen määrät ja sekoitusajat, joilla saatiin kokeissa käytettävien laastimassojen ominaisuudet ohjearvojen mukaisiksi. Kokeissa käytetyt laastit ja tuoreiden laastimassojen ominaisuudet löytyvät kappaleesta 5.4 ja taulukosta 5.1.

Sopiva ilmamäärä parantaa laastin työstettävyyttä ja pakkasenkestävyyssominaisuuksia, mutta ilmamäärän noustessa liian suureksi se alentaa laastin lopullista lujuutta ja huonontaa laastin tartuntaa. *Hobart* - piensekoittajalla laastin ilmamäärä lisääntyy nopeammin kuin työmaalla käytettävillä porakonevispilällä ja vapaapudotussekoittajalla. Sitä käytettäessä sekoitusajan tulee olla lyhyempi ja tuoreen laastin ilmamäärä on syytä mitata. Kokeisiin käytettävistä laasteista ilmamäärä mitattiin kuvan 5.1 mukaisella ilmamäärän mittausrakenteella ja mittausrakenteella on esitelty lyhyesti seuraavalla sivulla.

Ensin paineastia täytettiin tuoreella laastimassalla ja määritettiin laastin ominaispaino (g/dm^3) punnitsemalla. Sen jälkeen kansi asetettiin paikoilleen ja kannen tyhjä tila täytettiin vedellä astian sivuventtiilien kautta. Kannen ollessa tiiviisti suljettuna astiaan pumpattiin tietty paine, jota seurattiin kannen mittarin avulla. Lopulta paine vapautettiin aukaisemalla mittauslaitteen pääventtiili, jonka jälkeen mittauslaite antoi laastin sisältämän ilmamäärän laastin kokonaistilavuudesta (til-%).

Laastin notkeus on tärkeä työstettävyyteen liittyvä ominaisuus, joka riippuu laastityypistä ja laastin käyttötarkoituksesta. Notkeuteen vaikuttaa pääasiassa laastin sideai-



Kuva 5.1 Ilmamäärän mittauslaite (ylhällä), Hobart - piensekoittaja (vas.) ja iskupöytä (oik.).

neet, lisäaineet, runkoaineen raekoko ja laastiin sekoitettavan veden määrä. Koneelliseen rappaukseen kehitettyjen laastien tulee olla juoksempia kuin esimerkiksi käsin rappaukseen tai muuraukseen kehitetyt laastit. Kokeisiin käytettävien laastien notkeus mitattiin iskupöytäkokeella ja leviämisen ohjearvot saatiin laastinvalmistajalta. Iskupöytäkokeessa tuoreesta laastimassasta tehtiin kartio metallisen muotin avulla. Kartio asetettiin iskupöydälle, jonka kampea pyöritettiin tasaisella nopeudella. Tämä sai aikaan pöytälevyn nopean, iskevän liikkeen, jota toistettiin yhteensä 15 kertaa. Tämän jälkeen laastikartion leviämä mitattiin mittanauhan avulla ja tarkastettiin pysyikö leviämä annettujen raja-arvojen sisällä. Iskupöytä on esitetty kuvassa 5.1. Tarkempi ohjeistus tuoreille laasteille tehtävistä kokeista

sekä kokeisiin käytettävistä laitteista on koottu kandidaatintyöhöni.

5.4 Tutkitut laastit

Tutkimuksessa käytettiin yhteensä neljää Saint-Gobain Weber Oy Ab:n laastia. Muut kokeissa käytetyt materiaalit on esitelty koekappaleiden valmistuksen yhteydessä. Seuraavilla sivuilla käydään lyhyesti läpi tutkittujen laastien koostumus, ominaisuudet ja käyttökohteet.

Muurauslaasti M 100/600 - weber.vetonit ML 5

Laastia käytetään pääasiassa poltettujen- ja kalkkiahiekkatiilien muuraukseen julkisivuissa ja väliseinissä. Muurauslaastin työohjeina toimii *Suomen rakentamismääräyskokoelma (B8: Tiilirakenteet, ohjeet, 2007)* ja *RYL 2000 (rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset)*. Talvimuurauksen osalta ohjeet ovat kappaleessa 4.1 esitettyjen ohjeiden mukaiset. Seuraavassa on lueteltu laastin ainesosat ja tärkeimmät ominaisuudet:

- Vedentarve: 3,0 - 3,5 litraa/25 kg
- Tartuntalujuus 28 d: Ominaisarvo $f_{ctk} > 0,04 \text{ N/mm}^2$ (SFS 176, osa V, liite C)
- Puristuslujuusluokka: M5 (SFS-EN 998-2: Puristuslujuuksien keskiarvo $\geq 5 \text{ MPa}$)
- Sideaine: Nopeasti kovettuva portlandsementti
- Runkoaine: Luonnonhiekk
- Raekoko: 0 - 4 mm
- Lisäaineet: Säänkestävyyttä ja työnettävyyttä parantavia lisäaineita

Laastin avulla tutkittiin kovettumisnopeutta eri lämpötiloissa ja jäätymisvesipitoisuuden vaikutusta tartuntalujuuteen. Koetulokset on esitetty kappaleissa 5.5 ja 5.6. Laastista tehtiin myös pakkaslisäaineistettu versio, jota käytettiin normaalin muurauslaastin lisäksi kappaleen 5.5 kokeissa.



Kuva 5.2 Väliseinän muurausta kalkkiahiekkatiilillä ja weber.vetonit ML 5 - laastilla. [21]

Rappauslaasti - weber.vetonit 414 UniRender

UniRender on kuituvahvisteinen rappauslaasti, joka sopii käsin levitettäväksi ja koneelliseen ruiskutukseen. Tyypillisesti sitä käytetään täyttörappauslaastina erilaisilla betoni-, harkko- ja tiilipinnoilla sekä kolmikerros- ja eristerappauksien täyttölaastina. *UniRender* soveltuu hyvin paksuihin täyttöihin ja sen suositeltava kerrospaksuus on 5 - 30 mm. *UniRender* - laastin työohjeet ovat kappaleessa 4.2 esitettyjen yleisten rappausohjeiden mukaiset. Laasti tulee pitää kosteana vähintään 2 d rappaustyön jälkeen, joka varmistetaan tarvittaessa vesisumutuksella. Seuraavassa on lueteltu laastin ainesosat ja tärkeimmät ominaisuudet:

- Vedentarve: 4 - 4,5 litraa/25 kg
- Puristuslujuus 28 d: 5 - 7 MPa
- Sideaine: Sementti ja kalkki
- Runkoaine: Luonnonhiekkä, kalkkikivi ja muovikuidut
- Raekoko: 0 - 4 mm
- Lisäaineet: Kapillaarista vedenimeytymistä vähentävät ja säänkestävyyttä parantavat lisäaineet

UniRender - laastin avulla tutkittiin laastin kerrospaksuuden vaikutusta jäätymiseen ja koetulokset on esitetty kappaleessa 5.7. Laastista tehtiin kokeita varten myös pakkaslisäaineistettu versio, jonka avulla tutkittiin pakkaslisäaineen vaikutusta suolahärmeiden määrään ja suolahärmeiden vaikutusta pinnoitteiden pysyvyyteen. Näitä koetuloksia tarkastellaan kappaleessa 5.8.



Kuva 5.3 *UniRender* - laastista valmistettu eristerappauslevy kokeita varten.

5.5 Laastien kovettumisnopeus eri lämpötiloissa



Kuva 5.4 Koekappaleita kylmäsäilytyksessä

Koesarjoilla selvitettiin normaalin ja pakkaslisäaineistetun *weber.vetonit ML 5* -laastin kuivumisnopeutta ja lujuuden kehitystä kylmissä lämpötiloissa. Käytännössä tämä vastaa pitkien viileiden ja pakkasjaksojen aikana tehtäviä muuraustöitä.

Koekappaleina käytettiin standardikokoisia ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) laastiprismoja. Koesarjoilla selvitettiin normaalin laastin lujuudenkehitys lämpötiloissa 0°C , $+5^\circ\text{C}$, $+10^\circ\text{C}$ ja huoneenlämpö. Huoneenlämmöstä käytetään taulukoissa ja kuvaajissa lyhennettä HL. Sillä tarkoitetaan laboratorion kokeen aikaisia olosuhteita, eli mittauksen mukaan

noin $+20^\circ\text{C}$ keskilämpötilaa. Laboratorion suhteellinen ilmankosteus vaihteli kokeiden aikana välillä 25...55 %RH ja mittauksista saatu keskiarvo oli noin 35 %RH. Pakkaslisäaineistetun laastin lujuudenkehitys tutkittiin lämpötiloissa 0°C , -5°C , -15°C ja HL. Lisäksi selvitettiin pakkaslisäaineistetun laastin lujuudenkehityksen jatkuminen kylmäsäilytyksen jälkeen sekä vesimäärän vaikutus laastin lujuudenkehitykseen kylmissä lämpötiloissa.

Kylmäsäilytys toteutettiin tavallisilla pystypakastimilla, joihin asennettiin tarkemmat digitaaliset termostaatit. Suurimmat lämpötilanvaihtelut olivat alle $0,5^\circ\text{C}$ halutusta lämpötilasta, joten tarkkuus oli riittävä suoritettuja kokeita varten. Yli 0°C :n säilytyslämpötilat toteutettiin tavallisella jääkaapilla ja säilytyslämpötiloja mitattiin prisman sisään valetulla termolangalla. Prisman sisäinen lämpötila vaihteli sykleittäin ja lämpötilanvaihtelut olivat suurimmillaan $0,5^\circ\text{C}$ koesuunnitelman mukaisesta lämpötilasta. Prisman keskilämpötila pysyi tarkalleen koesuunnitelman mukaisessa lämpötilassa. Kaikkien säilytyslämpötilojen kosteusolot on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1 Suhteellisen ilmankosteuden vaihteluvälit eri säilytyslämpötiloissa.

Lämpötila:	-15°C	-5°C	0°C	$+5...10^\circ\text{C}$	HL
%RH:	76...78	82...84	92...95	50...80	25...55

5.5.1 Kokeen kulku

Ennen laastin sekoittamista kuivalaasti ja vesi jäähdytettiin noin $+5^\circ\text{C}$:n lämpötilaan. Sekoituksen jälkeen tuoreen laastimassan lämpötilaa mitattiin termolangan avulla ja prismat valmistettiin aina laastin ollessa $+8...9^\circ\text{C}$:n lämpötilassa. Tällä varmistettiin, että vain laastin säilytyslämpötila vaikutti lujuudenkehityksen eroihin. Teräksiset pris-

mamuotit esijäähdytettiin säilytyslämpötilaan ja laastilla täytetyt muotit siirrettiin kylmäsäilytykseen heti valun jälkeen.

Tutkimussuunnitelman mukaisen kylmäsäilytysajan jälkeen prismoille suoritettiin kuormituskokeet, joissa selvitettiin laastien taivutusveto- ja puristuslujuudet (MPa). Lujuudet määritettiin jokaisesta prismasta sileät muottipinnat vastakkain. Kuormituslaitteisto on esitetty kuvassa 5.11. Ennen kuormituskokeita varmistettiin, etteivät koekappaleet olleet jäässä. Tämä saatiin selville prisman keskikohtaan valetulla termolangalla, jonka avulla mitattiin eri lämpötiloissa säilytettyjen prismojen sulamiseen kuluvia aikoja. Kahden vuorokauden iässä kuormitetut prismat purettiin muoteistaan juuri ennen kuormituskokeita. Muut muotit purettiin 7 d prismojen valmistuksen jälkeen.

Taivutuskokeen jälkeen prismojen toinen pää kuivattiin $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa. Kuormituskokeen aikaisen painon ja kuivapainon erotuksen avulla saatiin laastin sisältämä vesimäärä, jonka mukaan laskettiin prismojen kuormituksen aikainen kosteuspitoisuus (p-%).



Kuva 5.5 Tuoreen laastin ja prisman lämpötilan mittausta termolangalla.

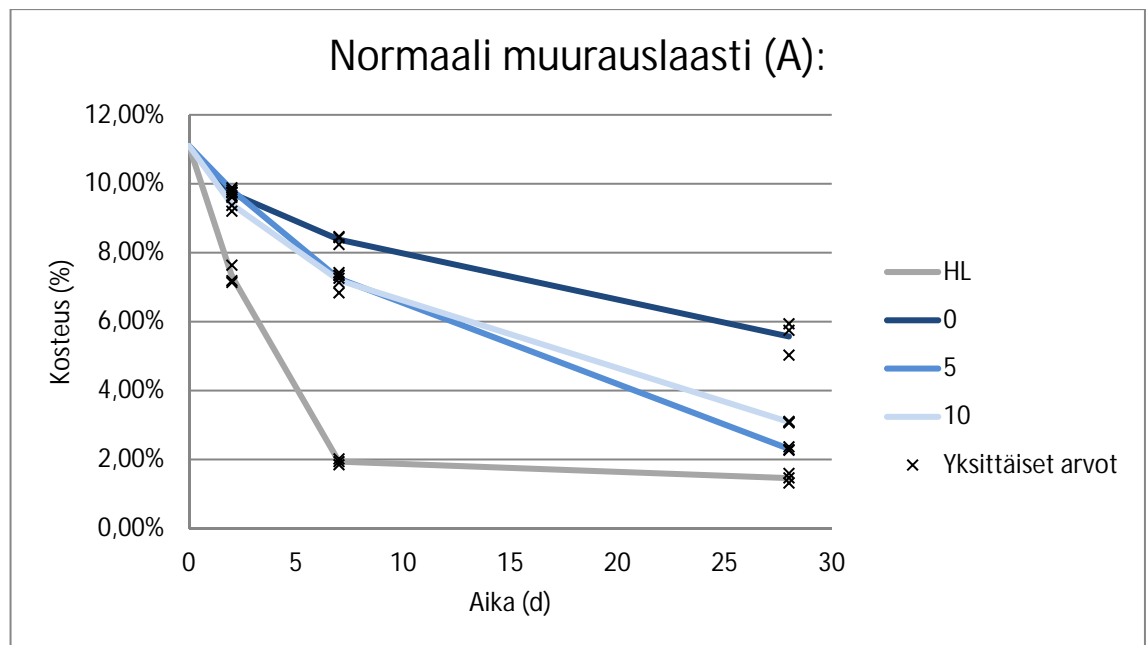
5.5.2 Tulokset

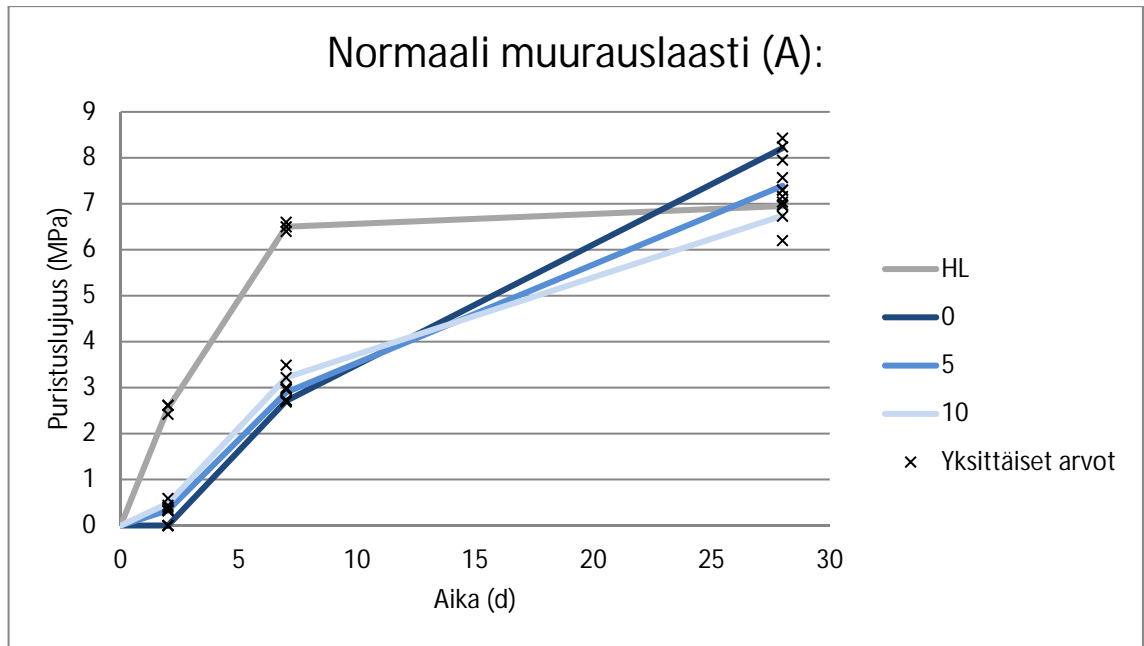
Koesarjat suoritettiin yhteensä kolmelle erilaiselle laastierälle, joiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 5.2. Kuormituskokeet tehtiin 2, 7 ja 28 d pituisen kylmäsäilytyksen jälkeen. Pakkaslisäaineistetuille laasteille suoritettiin kuormituskokeet myös 56 ja 84 d iässä, jolloin ne oli siirretty $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilasta huoneenlämpöön 28 d ikäisenä. Tällä selvitettiin laastin lujuudenkehityksen jatkumista pitkäaikaisen pakkasjakson jälkeen. Kuormituskokeet suoritettiin aina kolmelle rinnakkaiselle koekappaleelle, joiden tuloksista laskettiin keskiarvot.

Taulukko 5.2 weber.vetonit ML 5 - laastierät.

Laasti:	Pakkaslisäaine:	Vesi [g]:	Kuivalaasti [g]:	Ilmamäärä [til-%]:	Leviämä [mm]:
A	ei	500	4000	20	162
B	kyllä	375	4000	17	125
C	kyllä	460	4000	19,4	160

Laastierät A ja C olivat ominaisuuksiltaan laastinvalmistajan ohjearvojen mukaiset, mutta laastierä B oli huomattavasti ohjearvoja jäykempää. Tämän laastierän avulla selvitettiin vesimäärän vaikutusta lujuudenkehitykseen kylmissä lämpötiloissa. Seuraavissa kuvaajissa on esitetty koetulokset laastierien kuivumisesta ja lujuudenkehityksestä eri lämpötiloissa.

**Kuva 5.6** Normaalin muurauslaastin (A) kuivuminen eri lämpötiloissa (°C).



Kuva 5.7 Normaalin muurauslaastin (A) lujuudenkehitys eri lämpötiloissa (°C).

Normaali muurauslaasti kuivui kylmissä lämpötiloissa selvästi hitaammin kuin huoneenlämmössä. Lämpötilassa 0 °C kuivuminen oli hitainta ja laastin kosteuspitoisuus oli 28 d jälkeen vielä 5,6 %. Huoneenlämmössä kosteuspitoisuus oli jo 7 d jälkeen noin 2 % ja 28 d jälkeen 1,5 %, joten kosteus poistui laastista huomattavasti nopeammin kuin kylmässä säilytetystä. Yksittäisistä arvoista nähdään, että koetulosten hajonnat saatiin pysymään pieninä. Tämä saatiin aikaan valmistamalla kaikki koekappaleet huolellisesti samalla menetelmällä ja tekemällä rinnakkaiset koekappaleet samasta laastierästä.

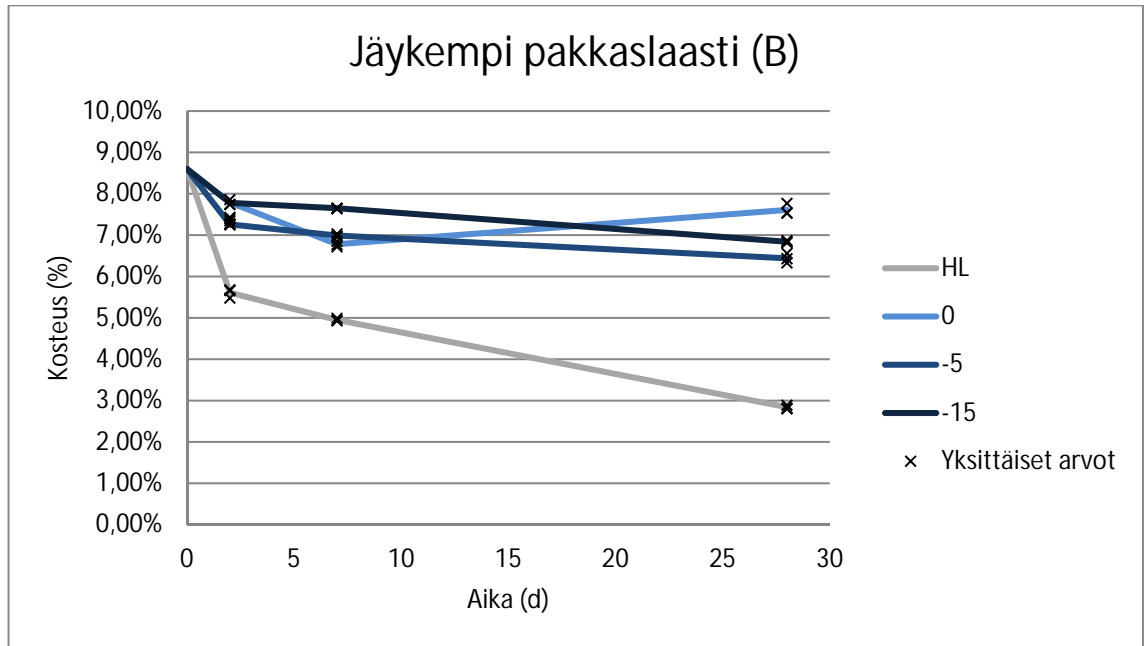


Kuva 5.8 Kuormitettuja koekappaleita.

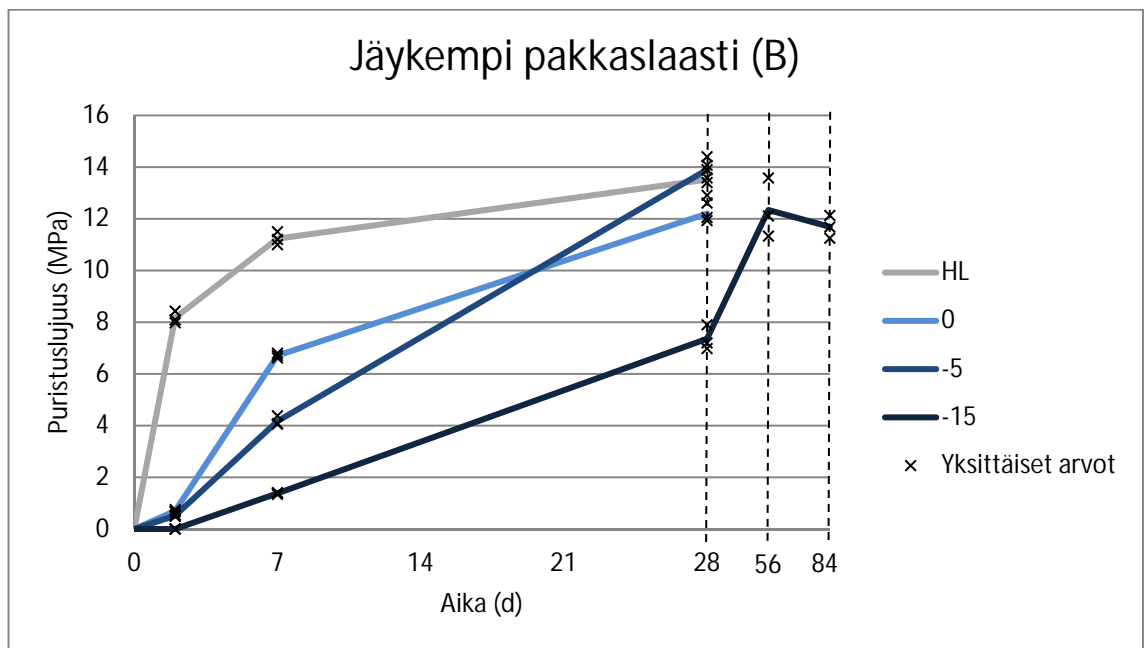
Kahden vuorokauden jälkeen vain huoneenlämmössä säilytettyihin prismoihin oli kehittynyt merkittävää lujuutta. Lämpötilassa 0 °C säilytetyt prismat vaurioituivat jo muottia purettaessa. Ensimmäisen viikon aikana puristuslujuus kehittyi sitä nopeammin, mitä lämpimämmässä prismoja säilytettiin. Huoneenlämmössä säilytettyjen prismojen lujuus oli 7 d jälkeen 6,5 MPa ja muissa lämpötiloissa lähellä arvoa 3 MPa. 28 d kylmäsäilytyksen jälkeen lämpötiloissa +5 °C (7,4 MPa) ja 0 °C (8,2 MPa) säilytetyistä prismoista tuli kuitenkin lujimpia. Pitkään säilynyt

kosteus näytti vaikuttavan positiivisesti puristuslujuuteen. Laasti ylitti kaikissa lämpötiloissa puristuslujuusluokan M5 vaatiman lujuuden 28 d iässä.

Kokeissa käytetty jäykempi pakkaslaasti (B) ei sovellu sellaisenaan muuraustöihin. Laastin avulla tutkittiin vesimäärän vaikutusta lujuudenkehitykseen kylmissä lämpötiloissa.



Kuva 5.9 Jäykemmän pakkaslaastin (B) kuivuminen eri lämpötiloissa (°C).



Kuva 5.10 Jäykemmän pakkaslaastin (B) lujuudenkehitys eri lämpötiloissa (°C). Ensimmäisen katkoviivan kohdalla koekappaleet on siirretty huoneenlämpöön.

Myös jäykemmän pakkaslaastin (B) kuivuminen riippui säilytyslämpötilasta. Huoneenlämmössä kuivuminen tapahtui huomattavasti nopeammin kuin kylmissä lämpötiloissa. Lämpötilassa 0 °C säilytettyihin prismoihin näytti kerääntyvän lisää kosteutta välillä 7...28 d. Asia varmistettiin tekemällä kyseinen koesarja uudestaan, jolloin sama ilmiö toistui. Tämä voidaan selittää pakastimen suurella suhteellisella ilmankosteudella sekä lämpötilan syklisellä vaihtelulla, jolloin koekappaleet olivat ajoittain kylmempiä kuin

ympäröivä ilma. Tällöin koekappaleiden pintaan on voinut kondensoitua vettä, joka imeytyi koekappaleisiin kapillaarisesti. Huoneenlämmössä 28 d säilytettyjen prismojen kosteuspitoisuus oli 2,8 %, eli pakkaslaastin vedenpidättävyyskyky oli parempi kuin normaalilla laastilla.

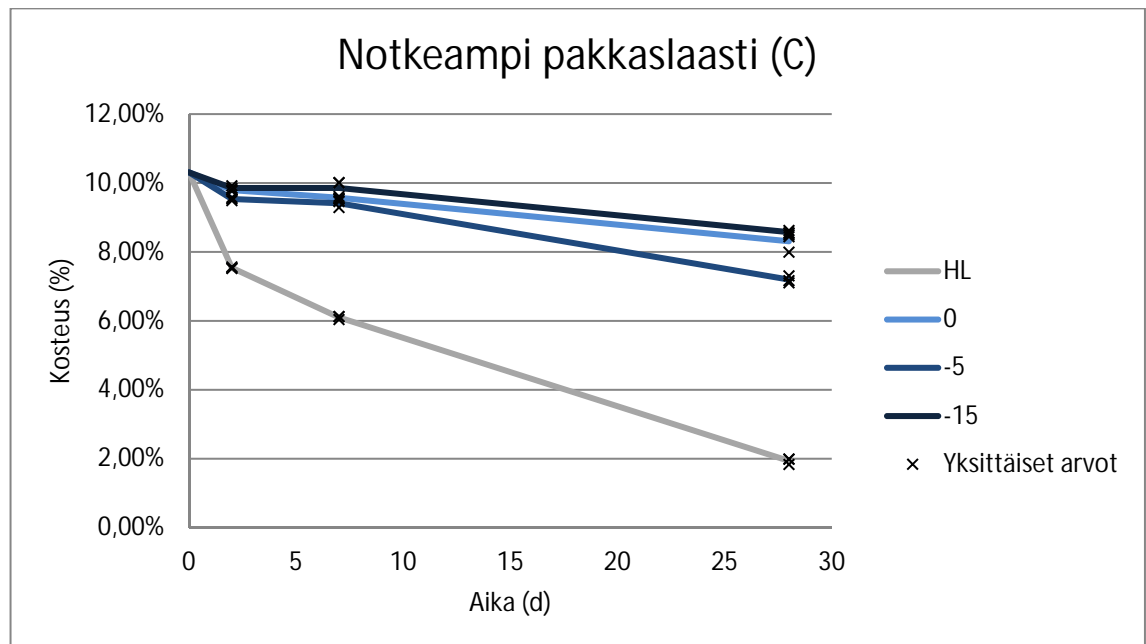


Kuva 5.11 Laastiprismojen kuormituslaitteisto.

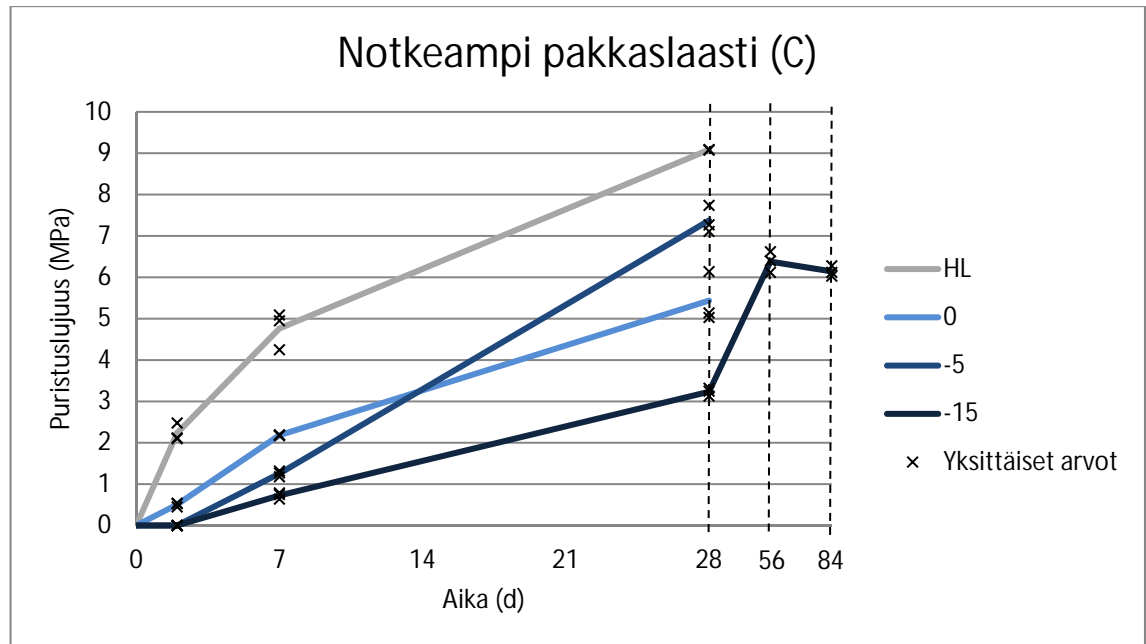
Puristuslujuus kehittyi kylmissä lämpötiloissa hitaammin. 28 d jälkeen lämpötilassa $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ säilytetty laasti oli lujinta (13,9 MPa) ja lämpötilassa $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ säilytettyjen prismojen lujuus oli 28 d ikäisenä 7,36 MPa. Jäykän pakkaslaastin lujuudet olivat kaikissa lämpötiloissa huomattavan suuria verrattuna normaalin muurauslaastin lujuuksiin. Kuvan 5.10 katkoviivoin rajattu alue esittää lämpötilassa $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ säilytettyjen koekappaleiden lujuuden-

kehityksen jatkumista huoneenlämpöön siirtämisen jälkeen. Tuloksista nähdään, että prismojen lujuudenkehitys jatkui selvästi seuraavan 28 d aikana. Lopullinen lujuus oli kyseisillä koekappaleilla noin 12 MPa. Laastin lujuusluokan M5 vaatima puristuslujuuksien keskiarvo on 5 MPa, joten jäykemmästä pakkaslaastista mitatut puristuslujuudet olivat suurimmillaan melkein kolminkertaisia verrattuna siihen.

Notkeampi pakkaslaasti (C) tehtiin laastinvalmistajan ohjearvojen mukaiseksi, joten se soveltuu hyvin muuraukseen.



Kuva 5.12 Notkeamman pakkaslaastin (C) kuivuminen eri lämpötiloissa ($^{\circ}\text{C}$).



Kuva 5.13 Notkeamman pakkaslaastin (C) lujuudenkehitys eri lämpötiloissa (°C). Ensimmäisen katkoviivan kohdalla koekappaleet on siirretty huoneenlämpöön.

Huoneenlämmössä lujuus kehittyi nopeimmin ja 28 d aikana näistä koekappaleista tuli lujimpia (9,1 MPa). Kaikilla säilytyslämpötiloilla lujuudet jäivät huomattavasti pienemmiksi kuin jäykemmällä pakkaslaastilla. Lämpötilassa -15 °C säilytettyjen prismojen puristuslujuuslujuus oli 28 d ikäisenä 3,2 MPa, eli alle puolet pienemmällä vesimäärällä tehtyihin prismoihin verrattuna. Siirrettäessä prismat huoneenlämpöön lujuudenkehitys jatkui selvästi ja puristuslujuudeksi saatiin 6,4 MPa 56 d iässä. Silloin koekappaleet ylittivät M5 lujuusluokan laastilta vaaditun puristuslujuuden. Kuivalaastiin sekoitettulla vesimäärällä oli suuri vaikutus pakkaslaastin lujuudenkehitykseen kylmissä lämpötiloissa. Tätä asiaa on käsitelty tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

5.5.3 Johtopäätökset

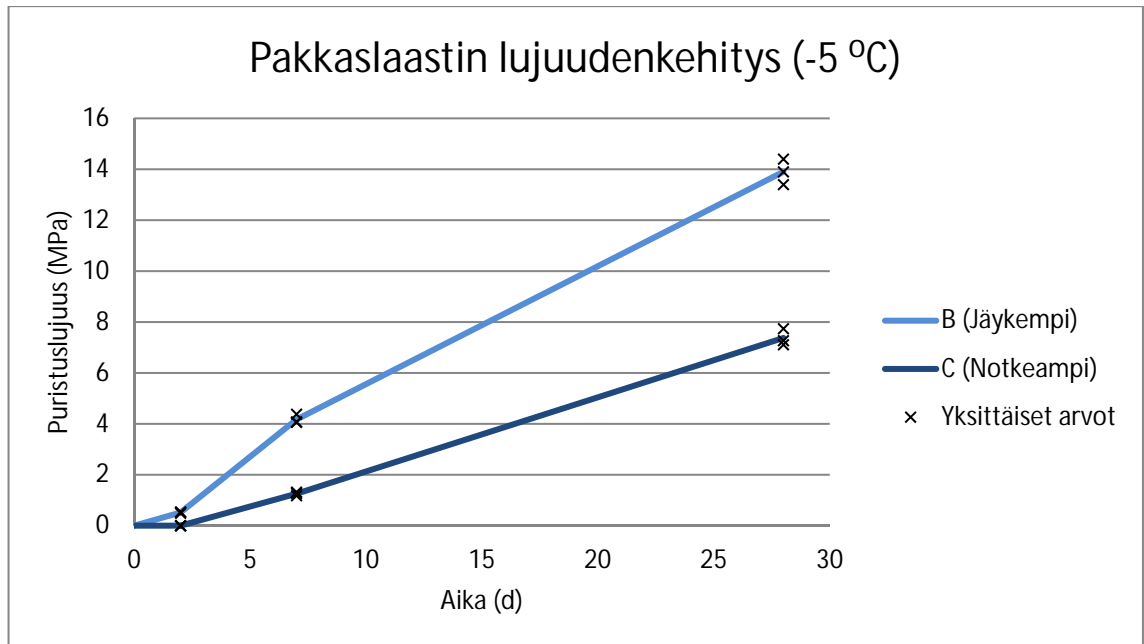
Normaalin muurauslaastin lujuudenkehitys hidastui huomattavasti lämpötilan laskiessa +10 °C:n tasolle, verrattuna huoneenlämmössä tapahtuvaan lujuudenkehitykseen. Lujuudenkehityksessä ei ollut suurta eroa lämpötiloissa 0...+10 °C. Kaikki kokeessa käytetyt normaalista muurauslaastista valmistetut koekappaleet ylittivät M5 puristuslujuusluokan vaatiman lujuuden 28 d ikäisenä. Lämpötiloissa 0 °C ja +5 °C säilytetyistä laasteista kehittyi lopulta lujimpia, eli pitkään säilynyt kosteus vaikutti positiivisesti puristuslujuuksiin.

Kahden vuorokauden iässä merkittävää puristuslujuutta oli kehittynyt vain huoneenlämmössä säilytettyihin koekappaleisiin. Nykyisten talvimuurausohjeiden mukaan muurauslaastien riittäväksi esikovettumisaajaksi voidaan katsoa 2 d yli 0 °C:n lämpötilassa, ennen laastin jäätymistä. Suoritetun koesarjan perusteella lämpötiloissa 0...+5 °C säilytettyjen koekappaleiden puristuslujuus oli tämän esikovettumisaajan jälkeen vielä

lähellä arvoa 0 MPa. Käytännön tilanteissa tiilien imu on yleensä tässä ajassa vähentänyt muurauslaastin vesipitoisuuden niin pieneksi, ettei laastin jäätymisestä aiheudu haittaa. Ongelmia voi syntyä ainoastaan märkien tai erittäin hitaasti vettä imevien muurauskappaleiden tapauksessa. Työmaalla käytetty tuore laasti on tyypillisesti kokeessa käytettyä laastia lämpimämpää, jolloin alkuvaiheen lujuudenkehitys on nopeampaa. Mikäli muuraus suoritetaan talvimuurausohjeiden mukaisilla hyvän vedenimukyvyn omaavilla tiilillä ja lämmitetyllä laastilla voidaan olettaa, että 2 d pituinen esikovettumisaika on riittävä. Mikäli tiilien imu on erittäin huono ja laastin lämpötila on muuraushetkellä vain noin +8...9 °C, tarvitsee laasti kuitenkin pidemmän esikovettumisajan lämpötiloissa 0...+5 °C muurattaessa.

Muuraukseen sopiva notkeampi pakkaslaasti (C) saavutti M5 lujuusluokan vaatiman puristuslujuuden 28 d jälkeen lämpötiloissa 0 °C ja -5 °C. Lämpötilassa -15 °C säilytettyjen koekappaleiden puristuslujuus oli 28 d iässä vain 3,2 MPa, mutta vaadittu puristuslujuus kehittyi huoneenlämpöön siirtämisen jälkeen. Pitkä pakkasjakso ei siis vaikuttanut merkittävästi laastin lopulliseen lujuuteen. Sekä notkeampi että jäykempi pakkaslaasti saavutti suurimman lujuuden lämpötilassa -5 °C 28 d aikana. Laastinvalmistajan omissa kokeissa tulokset ovat olleet vastaavia, joten ilmiön syihin ei perehdytty tässä tutkimuksessa tarkemmin.

Vesimäärällä oli suuri vaikutus pakkaslaastin lujuudenkehitykseen kylmissä lämpötiloissa. Asiaa on tarkasteltu kuvassa 5.14, jossa vertaillaan -5 °C:n lämpötilassa tapahtuvaa lujuudenkehitystä. Jäykempään pakkaslaastiin kehittyi kahdessa vuorokaudessa 0,52 MPa:n suuruinen puristuslujuus, kun taas notkeammasta laastista tehdyt prismat murtuivat jo muottia purettaessa. Viikon kylmäsäilytyksen jälkeen ero oli suurimmillaan, jolloin notkeamman laastin puristuslujuus oli vain 30 % samasta kuivalaastista valmistettuun jäykempään pakkaslaastiin verrattuna. 28 d jälkeen vastaava puristuslujuuksien suhde oli 53 %. Notkeamman pakkaslaastin (C) sekoitusveden määrä oli 10,3 % ja jäykemmän pakkaslaastin (B) sekoitusveden määrä 8,6 % tuoreen laastin kokonaispainosta.



Kuva 5.14 Pakkaslaastin vesimäärän vaikutus lujuudenkehitykseen lämpötilassa -5 °C.

5.6 Laastin jäätymisvesipitoisuuden vaikutus tartuntalujuuteen



Kuva 5.14 Tiiliin kiinnitettyjä veto-levyjä.

Kokeessa tutkittiin normaalin muurauslaastin kosteuspitoisuuden merkitystä jäätymiseen. Koe vastaa käytännössä juuri muurattua seinää, joka pääsee jäätymään seuraavan yön aikana.

Koemenetelmänä käytettiin tartuntaveto-koetta laastipinnasta sekä laastin kosteuden määrittäystä kuivapunnituksena. Koetta varten valmistettiin vanerisia vetolevyjä ($100 \times 100 \text{ mm}^2$), joista osaan asennettiin vedenimeytysputket laastisauman kastelua varten. Kastelulla pyrittiin saamaan tartuntalujuuteen sama vaikutus, kun työmaalla tehtävällä tiiliseinän jälkihoidolla. Vanerilevyjen alapintaan tehtiin hyvä tartuntapinta auki kammatusta saneerauslaastista, jolla varmistettiin vetolevyn kiinnittyminen muurauslaastisaumaan.

Laastierät valmistettiin normaalista muurauslaastista taulukon 5.2 mukaisesti. Kokeen muurauskappaleina käytettiin poltettuja täystiiliä, joiden tärkeimmät ominaisuudet on lueteltu seuraavalla sivulla.

- Tiilityyppi: PT
- Koko (mm³): 257 * 123 * 57
- Kappaleen bruttokuivatiheys (kg/m³): 1900...2000
- Puristuslujuuden keskiarvo (MPa): 55...75
- Veden imeytyminen, maksimi: 12...14 %
- Veden alkuimunopeus (kg/m²): 2...3

Laastin sekoitusveden määrä pidettiin kokeen laastierissä vakiona, mutta jäätymisvesipitoisuuksiin saatiin vaihtelua tiilien eri kosteuspitoisuuksien avulla. Koekappaleissa käytettiin uunikuivattuja, kosteita ja täysin vedellä kyllästettyjä tiiliä. Koekappaleet laitettiin vetolevyn kiinnityksen jälkeen yhden vuorokauden mittaiseen kylmäsäilytykseen, jonka jälkeen niiden annettiin kovettua 28 d huoneenlämmössä ennen vetokokeita.

5.6.1 Kokeen kulku

Kaksi vetolätkää kiinnitettiin tutkittavalla laastilla jokaiseen kolmessa eri kosteustilassa olleeseen tiileen. Toinen vetolätkistä poistettiin ennen kylmäsäilytykseen siirtämistä, laastin kosteuspitoisuuden määrittystä varten. Koekappaleita säilytettiin vuorokausi lämpötiloissa 0 °C, -2 °C, -5 °C tai -15 °C, jonka jälkeen niiden annettiin kovettua 7 d huoneenlämmössä. Tämän jälkeen puolet koekappaleista jälkihoidettiin imeyttämällä 10 til-% vettä vedenimeytysputken kautta. Kaikki koekappaleet kuormitettiin 28 d kylmäsäilytyksen jälkeen.

Tarkoituksena oli saada kokeessa käytettäville tiilille kolme erilaista ja hallittua kosteustilaa. Asiaa tutkittiin kolmen tiilen avulla, jotka kuivattiin ensin uunissa +105 °C:n lämpötilassa. Punnitsemalla todettiin, että kaikki tiilien sisältämä vesi oli poistunut kahden vuorokauden uunikuivatuksen jälkeen. Näin saatiin myös ensimmäinen tiilien kosteustila, eli kuiva. Kuivat tiilet laitettiin vesiupotukseen ja niitä punnittiin tasaisin väliajoin. 14 d jälkeen tiilet olivat täysin vedellä kyllästettyjä, eli niiden paino ei enää noussut. Tiilien kosteuspitoisuuksien keskiarvo oli tällöin 10,7 %. Vesiupotuksen jälkeen tiilien annettiin valua 3 h ennen punnitusta. Jo kahden vuorokauden vesiupotuksen jälkeen tiilien kosteuspitoisuuden arvoiksi saatiin 9,5...10 %, joten kokeessa käytettäviä tiiliä oli tarpeetonta pitää vesiupotuksessa tämän kauemmin. Näin saatiin toinen hallittu kosteustila, eli märkä. Vesiupotuksesta tiilet siirrettiin huoneenlämpöön, jossa niiden annettiin valua 4...5 d. Tällöin tiilien kosteuspitoisuus oli laskenut 5...6 %:n tasolle. Jokainen tiili punnittiin erikseen ja painoa verrattiin kyseisen tiilen kuivapainoon, jotta jokaisen tiilen kosteuspitoisuus pystyttiin määrittämään. Valutuksen jälkeen tiilet laitettiin ilmatiiviisiin pusseihin 5 d ajaksi, jotta kosteus jakautui tiiliin tasaisesti ennen vetolevyjen kiinnitystä. Ilmatiiviissä pussissa säilytetyistä tiilistä ei poistunut kosteutta enää käytännössä lainkaan. Tällä menetelmällä saatiin kolmas hallittu kosteustila, eli kostea. Tiilien kosteuspitoisuudet ja niistä käytetyt merkinnät on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3 Tiilien kosteustilat.

Kosteustila	Kosteus	+105 °C	Vesiupotus	Valutus	Ilmatiivis pussi
Kuiva (A)	0 %	2 d	-	-	-
Kostea (B)	5...6 %	2 d	2 d	4...5 d	5 d
Märkä (C)	9,5 %	2 d	2 d	3 h	-

Kun tiilet olivat saavuttaneet halutun kosteustilan, valmistettiin huoneenlämpöisestä kuiva-aineksesta ja vedestä muurauslaastia. Laastin annettiin seistä noin 10 min, jonka jälkeen siitä tehtiin tasapaksuinen sauma tiilen yläpintaan suorareunaisen lastan ja 15 mm korkuisen vesivanerisen kulmamuotin avulla. Kun laasti oli tasoitettu muotin yläpintaan, painettiin vetolevy kiinni laastiin ja muotti poistettiin. Ylimääräinen laasti kerättiin talteen ja sauma tasoitettiin lastalla vetolätkien reunojen mukaisesti, jolloin sen ala-puolisen laastisauman koko oli $15 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. Näin pystyttiin helposti laskemaan puoleen koekappaleista imeytettävän veden määrä (10 til-%), joka oli 15 ml. Vetolevyjen päälle asetettiin $2 \times 1000 \text{ g}$ punnukset 7 d ajaksi, joka vastasi yläpuolisten tiilien painoa tiilimuurissa.

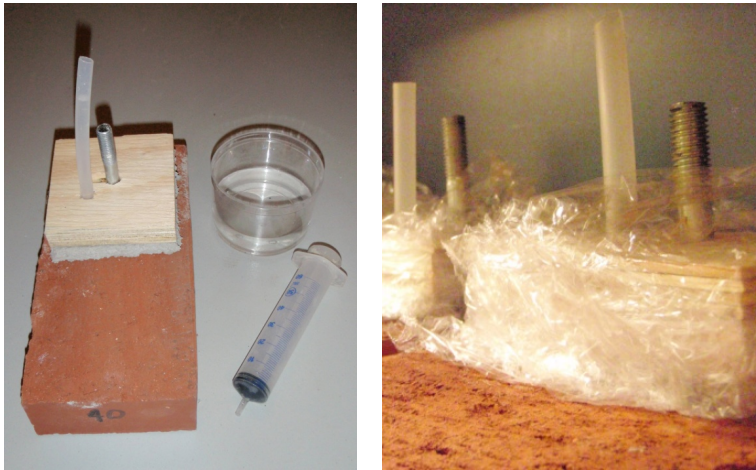
**Kuva 5.15** 15 mm paksuinen muurauslaastisauma.

Vetolätkien kiinnityksen jälkeen koekappaleiden annettiin kuivua tunti huoneenlämmössä. Tiilien hyvän vedenimukyvyyn takia laastisauman kosteus väheni huomattavasti jo tässä ajassa, paitsi märillä tiilillä. Toinen tiileen kiinnitetystä vetolätkistä irrotettiin ja märkä laastisauma kaavittiin lastalla metalliseen astiaan. Märkä laasti punnittiin ja tuloksesta vähennettiin tyhjän metalliastian paino. Märkä laasti laitettiin astiassa uuniin $+105 \text{ °C}$:n lämpötilaan vuorokauden ajaksi ja kosteuspitoisuus laskettiin painonmuutoksen avulla. Märän laastisauman irrotus ja kuivatusastia on esitetty kuvassa 5.16.

**Kuva 5.16** Laastisauman kosteuspitoisuuden määrittäminen.

Irrotettiin ja märkä laastisauma kaavittiin lastalla metalliseen astiaan. Märkä laasti punnittiin ja tuloksesta vähennettiin tyhjän metalliastian paino. Märkä laasti laitettiin astiassa uuniin $+105 \text{ °C}$:n lämpötilaan vuorokauden ajaksi ja kosteuspitoisuus laskettiin painonmuutoksen avulla. Märän laastisauman irrotus ja kuivatusastia on esitetty kuvassa 5.16.

Heti toisen vetolätkän irrotuksen jälkeen koekappale laitettiin kylmäsäilytykseen vuorokauden ajaksi. Tämä toteutettiin tavallisilla pystypakastimilla, joihin oli asennettu tarkemmat digitaaliset termostaatit. Termostaatin avulla säilytyslämpötilat saatiin pidettyä koesuunnitelman mukaisina.



Kuva 5.17 Laastisauman jälkihoito.

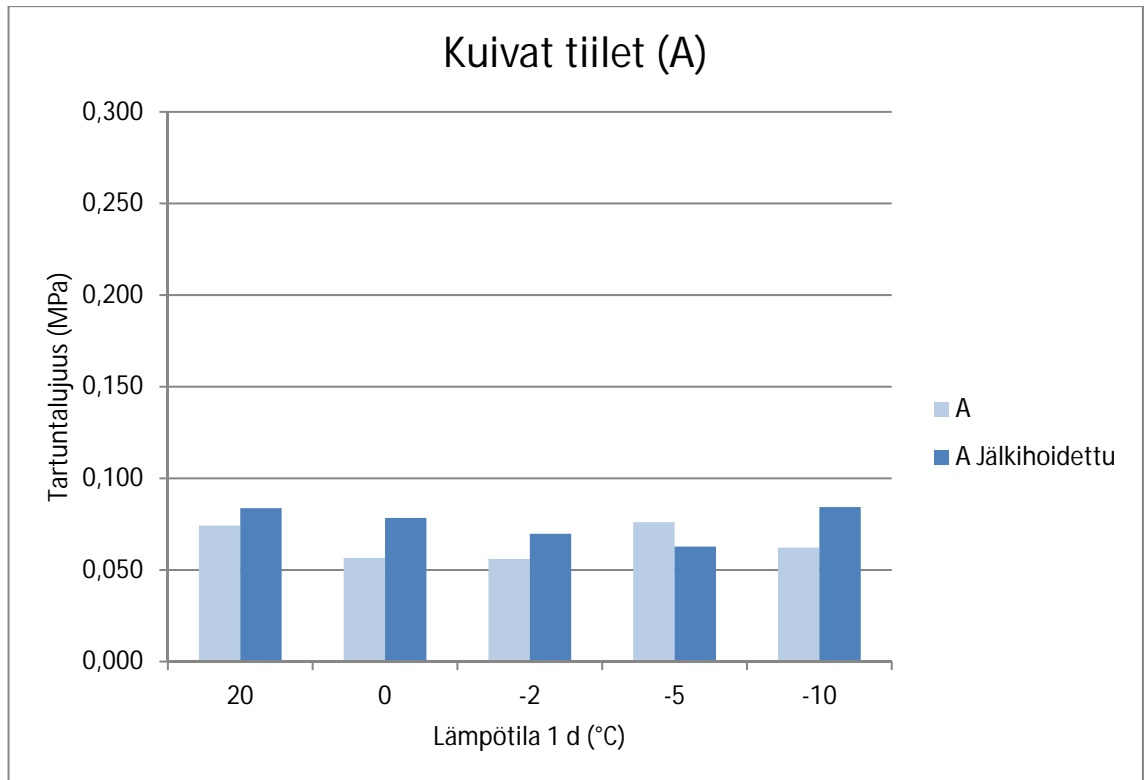
Puoleen koekappaleista imeytettiin 10 til-% vettä 7 d kylmäsäilytyksen jälkeen. Tämä vastasi työmaalla tehtävää tiiliseinän jälkihoitoa. Imeytys tehtiin vetolätkiin asennetun vedenimeytysputken kautta, johon ruiskutettiin yhteensä 15 ml vettä. Vedenimeytysputkiin mahtui kerrallaan noin 5 ml vettä, joten imeytys tehtiin

kolmessa osassa. Veden annettiin imeytyä laastisaumaan putken kautta painovoimaisesti. Tällä menetelmällä saatiin laastisauma kasteltua tasaisesti tiilen ja muurauslaastin rajapintaan asti. Tämä varmistettiin tarkastelemalla heti kastelun jälkeen irrotettua vetolätkää. Jälkihoito tehtiin aina 8 h aikana, joten jos vedenimeytysputken kautta ei tässä ajassa ehtinyt imeytyä koko vesimäärää, imeytettiin loput vedet laastisauman reunojen kautta. Kastelun jälkeen laastisauma peitettiin tuorekelmulla, jotta kosteus imeytyi tasaisemmin ja pysyi saumassa pidempään. Jälkihoitoon käytetty menetelmä on esitetty kuvassa 5.17

Kaikki koekappaleet kuormitettiin 28 d kylmäsäilytyksen jälkeen. Vetokokeet suoritettiin automaattisella koelaitteistolla, joka antoi tartunnan murtovoiman (kN). Tartuntalujuus (MPa) laskettiin kyseisen voiman ja muurauslaastisauman pinta-alan avulla.

5.6.2 Tulokset

Uunikuivattujen tiilien annettiin jäähtyä huoneenlämpöisiksi ennen vetolevyjen kiinnittämistä. Kuiviin tiiliin kiinnitetyn laastisauman kosteuspitoisuuksien keskiarvo oli 4,7 % pakastimiin laitettaessa. Tuore laasti tehtiin 11,1 %:n vesimäärällä, joten tunnin jälkeen kosteuspitoisuus oli laskenut alle puoleen alkuperäisestä kosteuspitoisuudesta. Tämä johtui kuivan tiilen hyvästä vedenimukyvyistä. Tartuntalujuuksien arvot on esitetty kuvassa 5.18.



Kuva 5.18 Vuorokauden mittaisen pakkasjakson vaikutus kuivien tiilien (A) ja laastin väliseen tartuntaan.

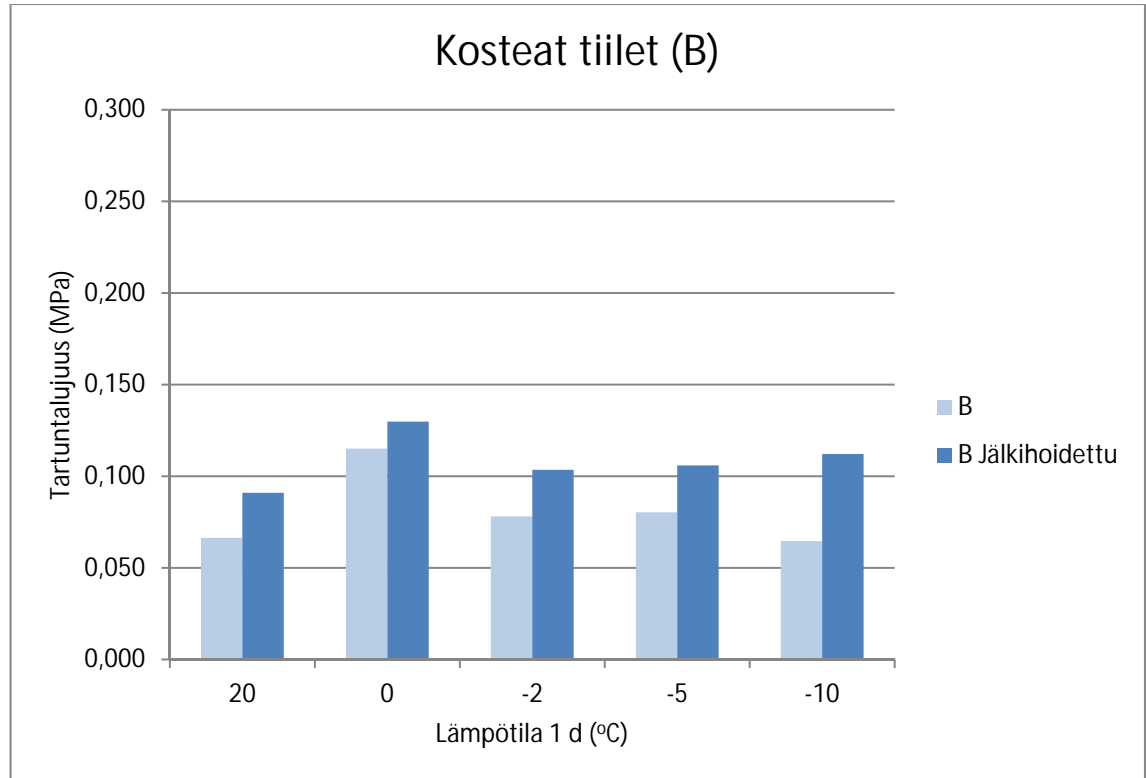


Kuva 5.19 Kuormitettuja koekappaleita (A). Murto tapahtui tiilen ja laastin rajapinnasta.

Tartuntalujuudet pysyivät samassa suuruusluokassa jokaisessa kylmäsäilytyslämpötilassa, joten näin alhaisella laastin kosteuspitoisuudella ei hetkellinen jäätyminen vaurioittanut tartuntaa. Kuivien tiilien ja laastin väliset tartuntalujuudet olivat luokkaa 0,06...0,08 MPa. Jälkihoito ei merkittävästi parantanut tartuntalujuutta uuni-kuivattujen tiilien tapauksessa. Tuoteselosteen mukaan *weber.vetonit ML 5* -laastin tartuntalujuuden ominaisarvo on 28 d jäl-

keen yli 0,04 MPa. Pienestä koekappaleiden määrästä johtuen tartuntalujuuksien ominaisarvoja ei laskettu, vaan lujuus määritettiin kolmen koekappaleen keskiarvon avulla. Tulokset eivät siis ole täysin verrattavissa tuoteselosteen ilmoittamaan arvoon. Kuvasta 5.19 nähdään koekappaleiden tyypillinen murtotapa, eli laasti irtosi tiilen pinnasta siististi. Laastisauma pysyi ehjänä ja tiilen pintaan jäänyt laasti oli vähäistä.

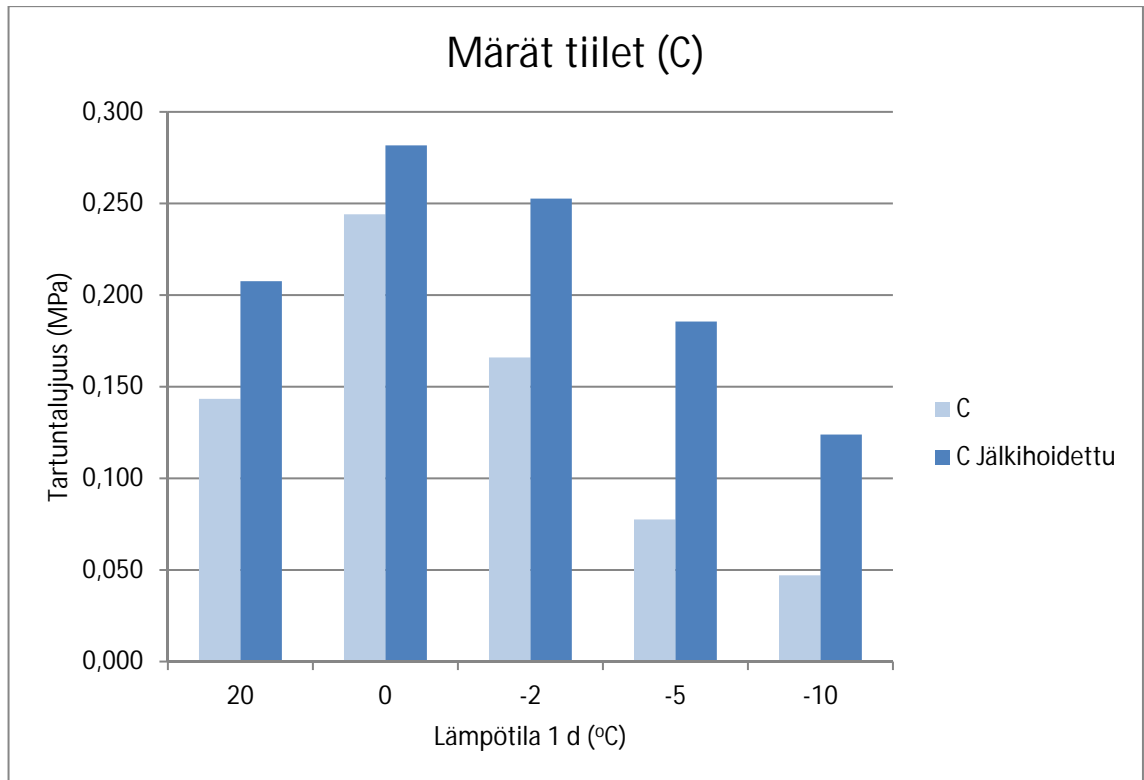
Kosteiden tiilien tasapainokosteudet saatiin pysymään välillä 5...6 %. Kosteilla tiilillä ei kuitenkaan näkynyt merkittävää vedenimukyvyn heikkenemistä, sillä pakastimeen laitteissa laastisauman kosteuspitoisuudet olivat laskeneet 5,5 %:n tasolle. Kuivilla tiilillä vastaava keskiarvo oli 4,7 %.



Kuva 5.20 Vuorokauden mittaisen pakkasjakson vaikutus kosteiden tiilien (B) ja laastin väliseen tartuntaan.

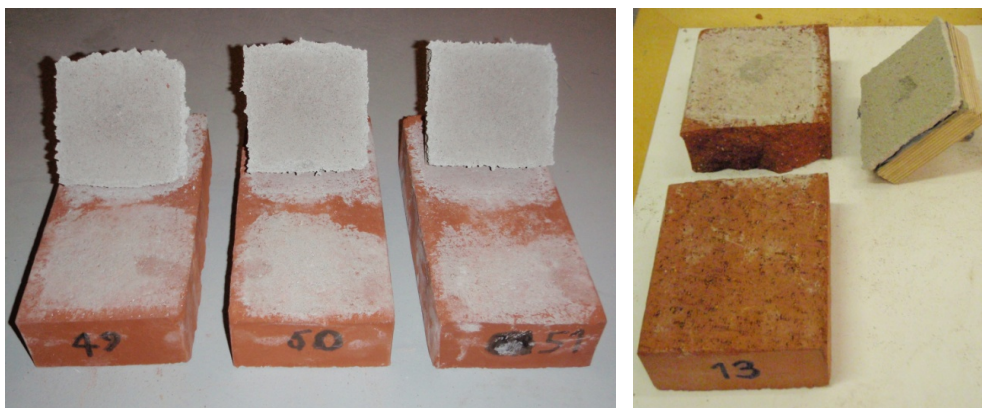
Jälkihoitamattomien koekappaleiden tartuntalujuudet olivat samaa luokkaa kuin kuvilla tiilillä. Parhaat tartuntalujuudet kehittyivät tiilille, jotka olivat olleet 0 °C:n kylmäsäilytyksessä vuorokauden ajan (0,12 MPa). Jälkihoidon tartuntaa parantava vaikutus näkyi tässä koesarjassa selvästi. Lämpötilassa -10 °C säilytyksessä olleiden tiilien tartuntalujuus kasvoi 73 % jälkihoidon avulla. Keskimääräinen lujuuden kasvu oli 38 %. Kaikkien kylmäsäilytyksessä olleiden koekappaleiden tulokset olivat parempia kuin huoneenlämmössä säilytettyjen, joten jäätyminen ei aiheuttanut vaurioita. Tyypillinen kosteiden tiilien murtotapa oli samankaltainen kuin uunikuivatuilla tiilillä.

Märkien tiilien tasapainokosteudet vaihtelivat välillä 8,8...10,5 %. Märkien tiilien vedenimukyky oli heikentynyt huomattavasti, sillä tunnin kuivumisen jälkeen laastisauman kosteuspitoisuuksien keskiarvo oli vielä 9,4 %. Hetkellisen jäätymisen vaikutukset märkiin tiiliin kiinnitettyjen laastisaumojen tartuntaan on esitetty kuvassa 5.21.



Kuva 5.21 Vuorokauden mittaisen pakkasjakson vaikutus märkien tiilien (C) ja laastin väliseen tartuntaan.

Tuloksista nähdään, että märkien tiilien ja laastin väliset tartuntalujuudet kehittyivät erittäin suuriksi lämpötiloissa 0...-2 °C säilytetyillä koekappaleilla. lämpötilassa 0 °C säilytettyjen koekappaleiden tartuntalujuudet olivat ilman jälkihoitoakin noin 0,25 MPa. Lämpötiloissa -5 °C ja -10 °C kylmäsäilytys oli heikentänyt laastisaumaa jo huomattavasti, mutta jälkihoito paransi tartuntalujuutta myös näiden koekappaleiden kohdalla. Märillä tiilillä laastin jäätymisvesipitoisuus jäi niin suureksi, että laasti vaurioitui jäätyessään. Tyypillinen murtotapa on esitetty kuvassa 5.22.



Kuva 5.22 Kuormitettuja koekappaleita (C). Tiilen pintaan jäänyt laasti oli runsasta ja osa koekappaleista murtui osittain laastisaumasta. Oikealla on suuren tartuntalujuuden takia kokeessa murtunut tiili.

5.6.3 Johtopäätökset

Poltetun täystiilen vedenimukyvyssä ei havaittu selvää huonontumista tiilen kosteuspiitoisuuden ollessa välillä 0...5.5 %. Tällöin tiilen imu pienensi laastin vesipitoisuuden alle yleisesti sallitun 6 %:n jäätymisvesipitoisuuden raja-arvon jo ennen kuin koekappaleet siirrettiin kylmäsäilytykseen. Näin alhaisella jäätymisvesipitoisuudella, ei hetkellinen jäätyminen vaurioittanut tiilen ja laastin välistä tartuntaa.

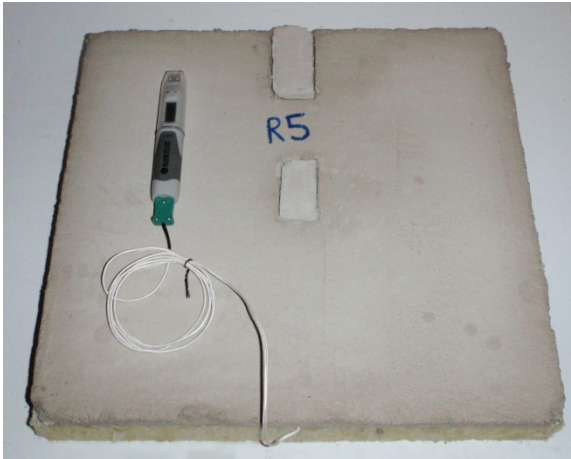
Nykyisessä talvimuurausohjeessa annetaan vaihtoehdoksi myös muurauskappaleiden lämmittäminen. Mikäli muurauskappaleet ovat lämpimiä ja täysin kuivia, voivat ne tiiliyypistä riippuen vähentää laastin vesipitoisuutta erittäin nopeasti. Kokeen perusteella huonoimmat tartuntalujuuksien arvot saatiin kuivien tiilien tapauksessa lämpötiloissa +20 °C, 0 °C, -2 °C ja -5 °C, eikä tartuntaa pystytty merkittävästi parantamaan jälkihoidon avulla.

Märkien tiilien, eli kosteuspiitoisuuden ollessa noin 9,5 %, vedenim ominaisuudet olivat selvästi huonommat ja laastin kosteus oli kylmäsäilytykseen siirrettäessä vielä 9,4 %. Tällä kosteuspiitoisuudella tartuntalujuuksista kehittyi kuitenkin selvästi koesarjan suurimmat lämpötiloissa +20 °C, 0 °C ja -2 °C, eli pitkään säilynyt kosteus vaikutti positiivisesti tartuntalujuuksiin. Vuorokauden mittainen säilytys lämpötiloissa -5 °C ja -10 °C heikensi tartuntaa jo selvästi, joten laastissa havaittiin jäätyksen aiheuttamaa vaurioitumista. Jälkihoito paransi tartuntaa myös näissä tilanteissa, mutta suuri jäätymisvesipitoisuus aiheuttaa riskin rakenteen lopulliselle toimivuudelle. Talvimuurausohjeiden mukaan märkiä tiiliä ei saa käyttää, joka on erittäin perusteltua tiilien jäätymisvaaran vuoksi. Jääkalvo tiilen pinnassa voi estää tartunnan syntymisen kokonaan.

Jos tiilimuuri on muurattu ilman talvimuurauksen edellyttämiä toimenpiteitä ja se pääsee yllättävän pakkasen vuoksi jäätymään, tulee laastisauman vesipitoisuuden kehittyminen tuntea. Jos kokeellisesti tai muulla luotettavalla tavalla voidaan todeta, että vesipitoisuus on laskenut alle 6 %:n ennen jäätymistä, ei se koetulosten perusteella aiheuta vaurioita laastin tartuntaan. Myös jälkihoidolla pystytään useimmissa tapauksissa parantamaan hetkellisesti jäätyneen laastin tartuntalujuutta.

5.7 Laastin kerrospaksuuden vaikutus jäätymiseen

Kokeessa tutkittiin *weber.vetonit 414 UniRender* - rappauslaastin kerrospaksuuden vaikutusta tuoreena tapahtuvaan hetkelliseen jäätymiseen. Koe vastaa käytännössä eristerappausseinää, joka pääsee jäätymään rappaustyön jälkeisen yön aikana.



Kuva 5.22 Eristerappauslevy, termolanka ja uunikuivatut koepalat.

Koe suoritettiin valmistamalla $400 \times 375 \text{ mm}^2$ kokoisia eristerappauslevyjä, jotka koostuivat 50 mm:n paksuisesta mineraalivillasta (FAL) ja sen pinnalle tehdyistä, eri paksuisista rappauslaastikerroksista. Laastikerroksien paksuudet olivat 10, 20 ja 30 mm. Kaikkien levyjen annettiin kovettua 4 tuntia huoneenlämmössä ennen vuorokauden mittaista kylmäsäilytystä. Säilytyslämpötilat olivat $-2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, jotka toteutettiin tavallisten pystypakastimien ja tarkempien digitaalisten termostaattien avulla. Rappauspinnan ja mineraalivillan rajapintaan asen-

nettiin termolanka, jolla mitattiin laastin jäätymisaikoja. Lisäksi jokaisesta levypaksuudesta mitattiin kosteuspitoisuus, ennen pakastimeen laittoa. Se onnistui leikkaamalla rappauslevyn keskeltä ja reunasta koepalat, jotka kuivattiin uunissa $+105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Kosteuspitoisuus laskettiin painonmuutoksen avulla. 20 mm:n paksuisesta rappauslevystä valmistettiin myös referenssikappale, jonka annettiin kovettua huoneenlämmössä. Puolet kaikista koekappaleista jälkihoidettiin 7 d kylmäsäilytyksen jälkeen, ja kaikille kappaleille suoritettiin vetokokeet 28 d kylmäsäilytyksen jälkeen. Vetokokeissa tutkittiin laastin sisäistä vetolujuutta (MPa).

5.7.1 Kokeen kulku



Kuva 5.23 Koekappaleen valmistusta.

Laastierät valmistettiin sekoittamalla 3500 g kuiva-laastia ja 600 g vettä, jonka jälkeen tuoreen laastin ominaisuudet määritettiin. Ilmamäärä oli 24 % ja leviämä 162 mm. Laastin notkeus ja ilmamäärä olivat tällöin valmistajan ohjearvon mukaiset. Sekoitettua laastia annettiin seistä 10 min ennen rappauslevyn valmistusta.

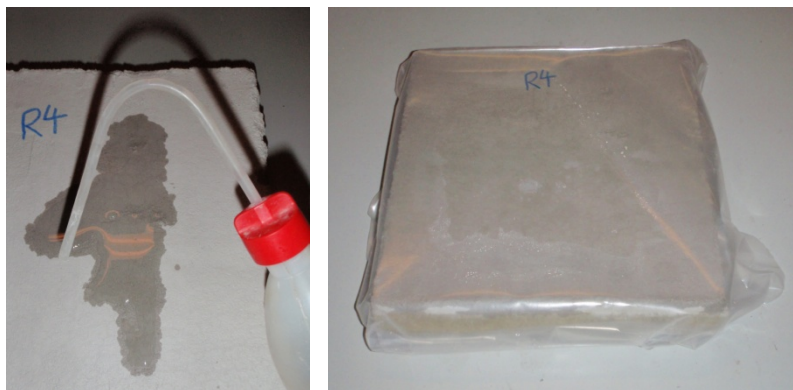
Koekappaleet valmistettiin vesivaneristen muottien avulla, joiden pohjalle asetettiin vanerilevy ja vierekkäin 2 kappaletta $37,5 \times 20 \text{ cm}^2$ kokoisia mineraalivillapaloja. Eristeiden päälle lisättiin laastia muotin yläpintaan asti, jonka jälkeen laastipinta tasoitettiin suorareunaisella las-talla. Laasti irrotettiin muotin reunoista ja muotti poistettiin varovasti nostaen. Näin

jäljelle jäi sileäpintainen ja tasapaksu eristerappauslevy, jonka alle jätetty vanerilevy mahdollisti tuoreen koekappaleen siirtelyn. Kaikkien koekappaleiden annettiin kovettua 4 tuntia huoneenlämmössä, jonka jälkeen niihin asennettiin termolanka ennen kylmäsäilytykseen siirtämistä.

Jokaisesta eri laastikerrospaksuudesta määritettiin kosteuspitoisuus neljän tunnin kuivumisen jälkeen. Kaikki koekappaleet tehtiin samoissa olosuhteissa ja samanlaisista laastieristä, joten kosteuspitoisuuden vaihtelut oletettiin pieniksi.

Lämmöneristeen ansiosta laasti jäähdyi pääasiassa yläkautta. Eristeen ja laastin väliin asetetulla termolangalla pystyttiin mittaamaan koko laastikerroksen jäätymiseen kulunutta aikaa. Lämpötilan mittaus suoritettiin automaattisesti aikaa ja lämpötiloja tallentavalla laitteella, josta tallennetut tiedot siirrettiin suoraan tietokoneelle. Laastien kosteuspitoisuudet ja jäätymisajat on käsitelty tarkemmin kappaleessa 5.7.2.

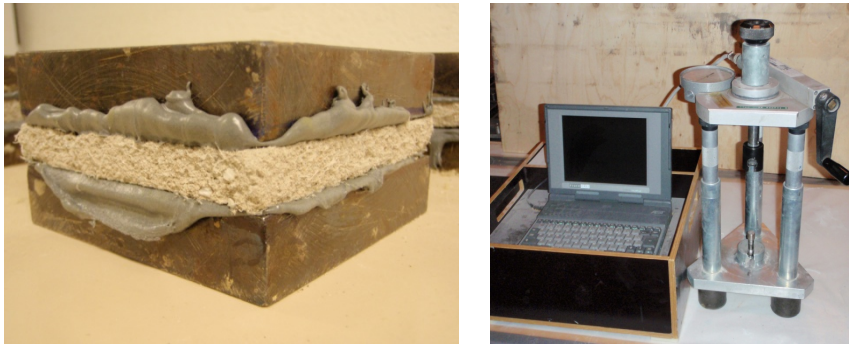
Puolet eristerappauslevyistä kasteltiin 7 d kylmäsäilytyksen jälkeen, joka vastaa työmailla tehtävää jälkihoitoa. Tämä toteutettiin imeyttämällä 10 til-% vettä rappauslaastiin, jonka jälkeen levy peitettiin muovilla. Vesimäärä mitattiin huolellisesti ruiskupulloon tarkkaa vaakaa käyttäen. Muovipeitteen annettiin olla jälkihoidettujen koekappaleiden päällä 7 d, jotta vesi ehti imeytyä tasaisesti levyyn ja vaikuttaa pidempään. Jälkihoitotoimenpiteet on esitetty kuvassa 5.24.



Kuva 5.23 Eristerappauslevyjen jälkihoito.

Kaikille koekappaleille suoritettiin vetokokeet 28 d kylmäsäilytyksen jälkeen. Rappauslevyistä leikattiin 6 rinnakkaista koepalaa, jotka liimattiin metallisten vetolevyjen väliin. Leikkaamiseen käytettiin kulmahiomakonetta, jonka jälkeen lämmöneriste poistettiin villapuukon ja teräsharjan avulla. Vetolevyjen koko oli $95 \times 95 \text{ mm}^2$ ja ne kiinnitettiin käsikäyttöiseen vetokoelaitteistoon, joka antoi murtovoiman (kN). Rappauslaastin lujuus saatiin laskettua edellä mainitun voiman ja vetolevyn pinta-alan avulla (MPa).

Vetokokeissa oli tarkoitus saada koepala murtumaan laastilevyn keskeltä ja laskea vastaava maksimijännitys. Näin saatiin selville rappauslaastin sisäinen vetolujuus ja pystyttiin vertailemaan eri lämpötiloissa säilytettyjä eristerappauslevyjä. Vetokoekappale -laitteisto on esitetty kuvassa 5.24.



Kuva 5.24 Vetolevyjen väliin liimattu koepala ja vetokoelaitteisto.

5.7.2 Laastin kosteuspitoisuus ja jäätyminen

Laastikerroksista leikattujen koepalojen avulla saatiin määritettyä laastin kosteuspitoisuudet. Tulokset on esitetty taulukossa 5.4.

Kosteuspitoisuus:			
Kerrospaksuus	Reunapala	Keskipala	Keskiarvo
10 mm	12,24 %	12,52 %	12,4 %
20 mm	12,98 %	13,02 %	13,0 %
30 mm	13,44 %	13,73 %	13,6 %

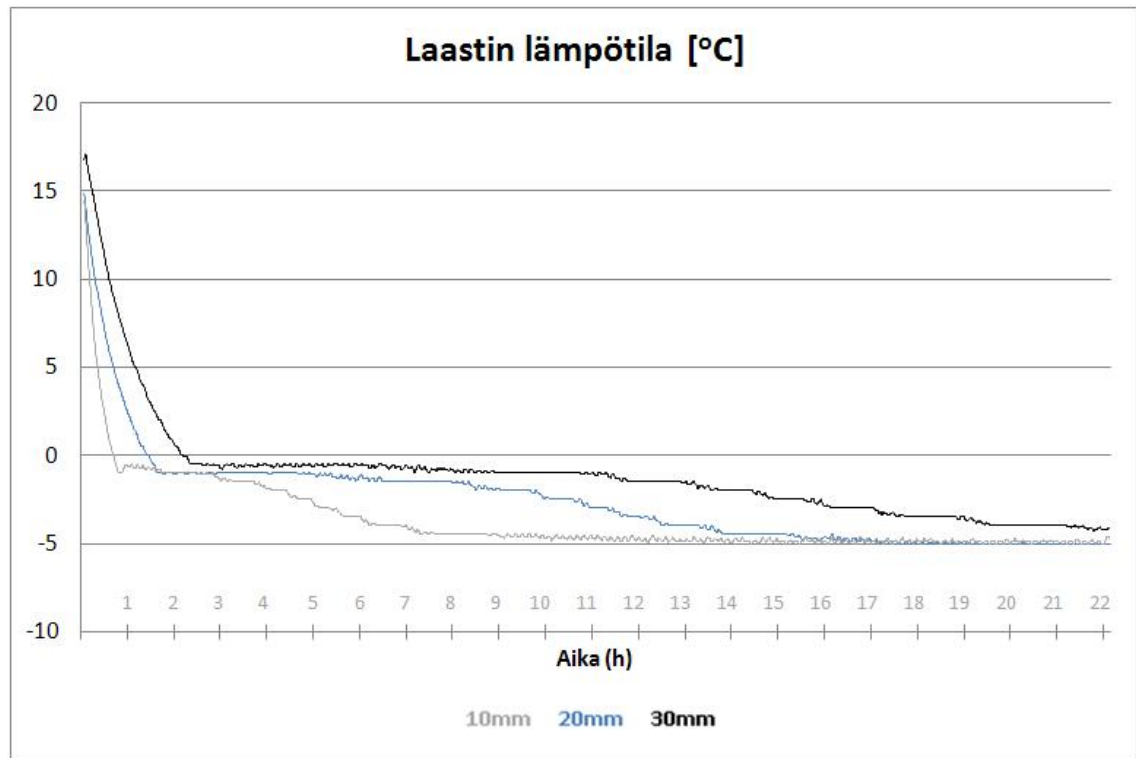
Taulukko 5.4 Laastin kosteuspitoisuudet ennen kylmäsäilytykseen siirtämistä.

Paksuimman laastikerroksen kosteuspitoisuus pysyi odotetusti suurimpana. 10 mm paksuisen laastikerroksen kosteuspitoisuus oli vähentynyt 2,2 prosenttiyksikköä laastin sekoitushetkestä. Laastiin lisätty vesimäärä oli 14,6 %. Rappauslevyn reunoilta irrotetut palat olivat kuivuneet hieman enemmän kuin keskiosan palat, mutta erot eivät olleet merkittäviä näin lyhyellä kuivumisajalla.

Termolangalla mitattiin lämpötiloja koko kylmäsäilytyksen ajan. Taulukosta 5.5 ja kuvasta 5.25 nähdään eri paksuisten laastikerrosten lämpötilojen kehitys -5 °C:n säilytyksessä.

Taulukko 5.5 Laastin lämpötilankehitys -5 °C:n säilytyslämpötilassa.

Kerrospaksuus	Säilytyslämpötila	Laastin lämpötila = 0 °C	Laastin lämpötila = -5 °C
10 mm	-5 °C	45 min	7 h
20 mm	-5 °C	90 min	14 h
30 mm	-5 °C	120 min	22 h



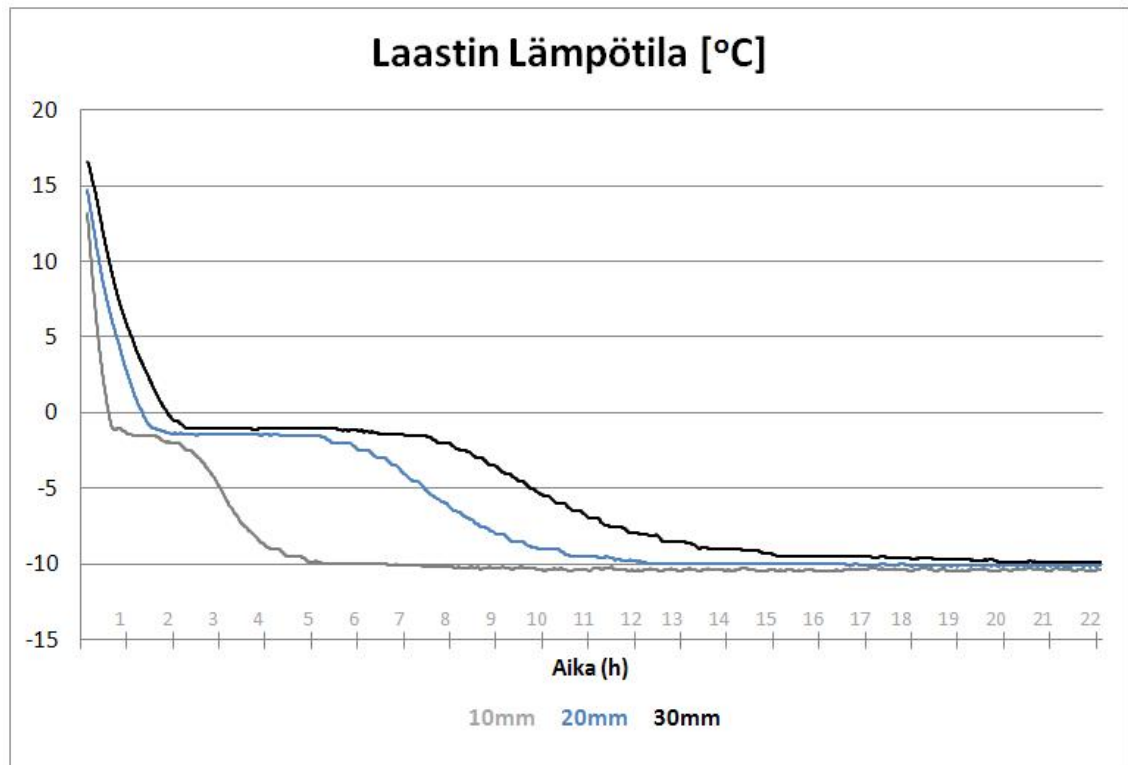
Kuva 5.25 Laastin lämpötilan kehitys -5 °C:n säilytyslämpötilassa.

Kuvaajista nähdään, että kaikki lämpötilat laskivat ja tasaantuivat nopeasti välille -0,5 ...-1,5 °C. Tämän jälkeen kesti useita tunteja, ennen kuin laastikerroksien lämpötila laski säilytyslämpötilaan. 30 mm:n paksuinen laastikerros saavutti -5 °C:n lämpötilan vasta 22 h kohdalla, joten vuorokauden mittaisena kylmäsäilytysaikana se ehti pysyä kyseisessä lämpötilassa vain 2 h. Kuvaajien muoto on tyypillinen laastin jäätymiselle ja se voidaan jakaa kolmeen osaan. Aluksi lämpötila laskee nopeasti lähelle jäätyispistettä, jonka jälkeen se tasaantuu hieman 0 °C:n alapuolelle. Tämä johtuu vedelle ominaisesta kyvystä sitoa lämpöä vielä jäätyispisteessään. Lopuksi laasti jäätyy ja lämpötila saavuttaa ympäröivän ilman lämpötilan. Laastin jäätyminen tapahtui käytännössä vasta noin -1 °C:n lämpötilassa. [4 s. 32]

Vastaavat mittaukset suoritettiin myös -10 °C:n lämpötilassa säilytetyille koe-kappaleille ja tulokset on esitetty taulukossa 5.6 ja kuvassa 5.26.

Taulukko 5.6 Laastin lämpötilankehitys $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:n säilytyslämpötilassa.

Kerrospaksuus	Säilytyslämpötila	Laastin lämpötila = $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Laastin lämpötila = $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$
10 mm	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	30 min	3 h
20 mm	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	60 min	8 h
30 mm	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	85 min	12 h



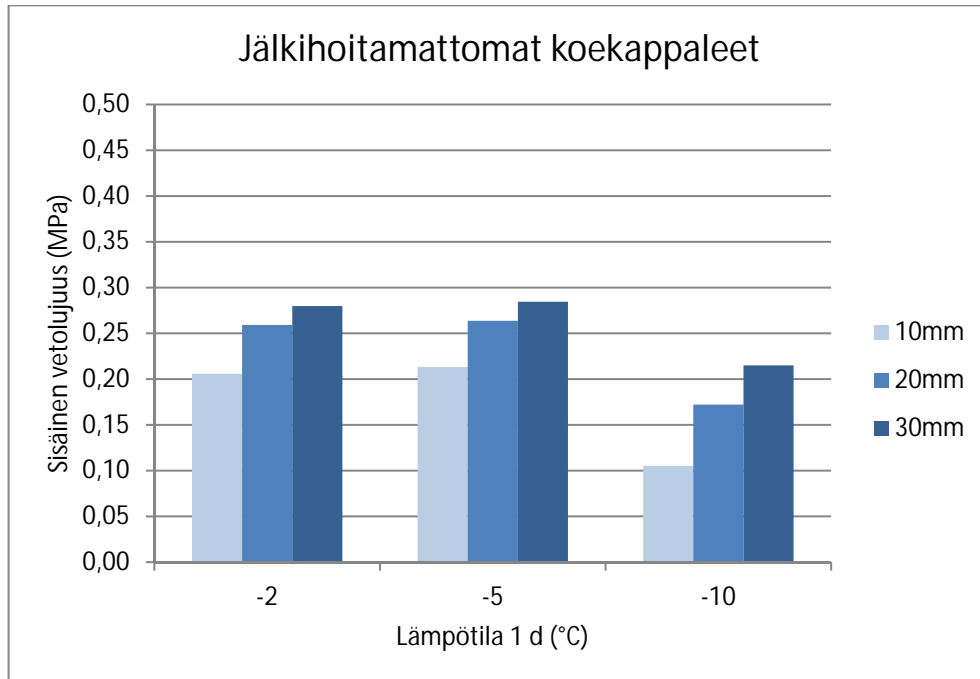
Kuva 5.25 Laastin lämpötilan kehitys $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:n säilytyslämpötilassa.

10 mm:n paksuinen rappauslevy jäähdyi jo kolmessa tunnissa ympäröivän ilman lämpötilaan, mutta 30 mm:n paksuinen levy tasaantui noin viideksi tunniksi välille $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$... $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ennen kuin jäähtyminen jatkui. Silti 30 mm:n paksuinen laastikerroskin ehti pysyä $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa noin 12 h ajan vuorokauden mittaisen kylmäsäilytyksen aikana. Lämpötilakuvaajien muoto on samankaltainen kuin $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa, mutta lämpötilan tasaantumisvaihe jäätymispisteessä on lyhyempi.

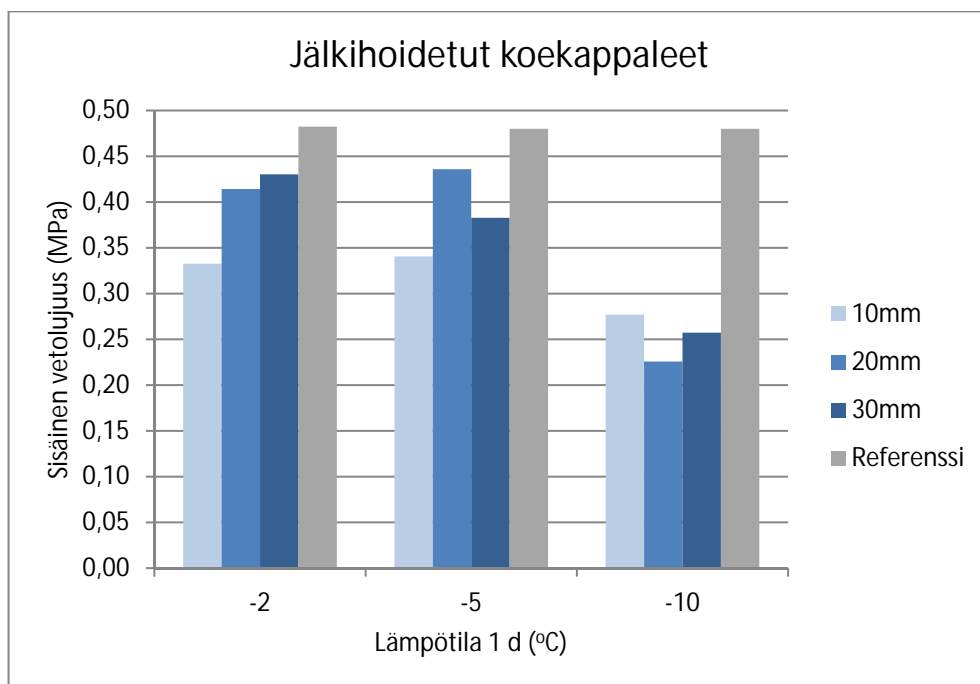
Kolmas säilytyslämpötila oli $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Siinä lämpötilassa vain 10 mm:n paksuinen laastikerros jäähdyi ympäröivän ilman lämpötilaan ja siihen kului noin 12 h. 20 ja 30 mm:n paksuisten laastikerrosten lämpötila ei laskenut alle $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$:n vuorokauden aikana.

5.7.3 Tulokset

Puolet koekappaleista tehtiin ilman jälkihoitoa ja puolet jälkihoidettiin 7 d kylmäsäilytyksen jälkeen. Jälkihoidettujen koekappaleiden vetokoetuloksia verrattiin myös referenssikappaleen tuloksiin. Vetokokeiden tulokset on esitetty kuvissa 5.26 ja 5.27.



Kuva 5.26 Jälkihoitamattomien koekappaleiden lujuudet.



Kuva 5.27 Jälkihoidettujen koekappaleiden lujuudet.

Referenssikoekappale laitettiin kosteushuoneeseen (75 %RH) heti valmistuksen jälkeen. Se kasteltiin sumuttamalla 1 d ikäisenä ja peitettiin muovilla kahden vuorokauden ajaksi. Tämän jälkeen sen annettiin kovettua huoneenlämmössä kuormitukseen asti. Referenssikoekappale vastaa siis ihanneoloissa kovettunutta ja jälkihoidettua rappauslevyä.



Kuva 5.28 Kuormitettu koekappale.

Vuorokauden mittainen säilytys lämpötilassa $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ heikensi laastin lujuutta selvästi. Tämä vaikutus näkyi sekä jälkihoitamattomien että jälkihoidettujen koekappaleiden tuloksissa. Lämpötiloissa $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ säilytettyjen jälkihoidettujen koekappaleiden sisäiset vetolujuudet olivat lähellä referenssikappaleen arvoja ($0,48\text{ MPa}$). 10 mm:n paksuisilla laastilevyillä arvot jäivät pienemmiksi ($0,33\ldots 0,34\text{ MPa}$).

Jälkihoitamattomista levyistä tuli heikompia ($< 0,3\text{ MPa}$) kaikissa lämpötiloissa, mutta jäätymisestä aiheutuva vaurioituminen näkyi näissäkin tuloksissa vasta $-10\text{ }^{\circ}\text{C:n}$ lämpötilassa. Jälkihoitamattomien koekappaleiden sisäinen vetolujuus oli verrannollinen rappauslaastipinnan paksuuteen. 30 mm:n paksuisista levyistä tuli lujimpia

ja 10 mm:n paksuisista levyistä heikoimpia kaikissa lämpötiloissa. Syynä voi olla paksuissa kerroksissa pidempään säilynyt kosteus ja hitaampi jäätyminen.

Koekappaleiden yksittäisistä vetokoetuloksista laskettiin keskihajonnat. Murtovoimien keskihajontojen keskiarvo oli kaikista koetuloksista $0,36\text{ kN}$. Suurimmillaan kuuden rinnakkaisen vetokoekappaleen keskihajonta oli $0,52\text{ kN}$. Hajontaa siis syntyi, mutta vetokoetulosten suuruusluokka pysyi koko ajan samana ja tuloksista saatiin selvästi keskenään vertailukelpoisia.

Vetokokeiden tuloksista tehtiin vertailutaulukot, joissa eri koekappaleista saatuja lujuuksia verrattiin referenssikappaleen lujuuteen. Vertailutaulukot havainnollistavat jälkihoidon merkitystä hetkellisestä jäätyneen rappauslaastin lujuuteen.

Taulukko 5.7 Jälkihoitamattomien eristerappauslevyjen vertailutaulukko.

Rappauslevy:	Paksuus:	T [$^{\circ}\text{C}$]	Lujuus [MPa]	Lujuus [%]
R1	10mm	-2	0,21	43 %
R2	10mm	-5	0,21	44 %
R3	10mm	-10	0,11	22 %
R4	20mm	-2	0,26	54 %
R5	20mm	-5	0,26	55 %
R6	20mm	-10	0,17	36 %
R7	30mm	-2	0,28	58 %
R8	30mm	-5	0,28	59 %
R9	30mm	-10	0,22	45 %
Referenssi	20mm	+20	0,48	100 %

Taulukko 5.8 Jälkihoidettujen eristerappauslevyjen vertailutaulukko.

Rappauslevy:	Paksuus:	T [°C]	Lujuus [MPa]	Lujuus [%]
R10	10mm	-2	0,33	69 %
R11	10mm	-5	0,34	71 %
R12	10mm	-10	0,28	57 %
R13	20mm	-2	0,41	86 %
R14	20mm	-5	0,44	90 %
R15	20mm	-10	0,23	47 %
R16	30mm	-2	0,43	89 %
R17	30mm	-5	0,38	79 %
R18	30mm	-10	0,26	53 %
Referenssi	20mm	20	0,48	100 %

Taulukoista nähdään, että jälkihoidolla oli erittäin suuri merkitys hetkellisesti jäätyneen rappauslaastin lujuuteen. Jälkihoitamattoman laastin lujuus oli parhaimmillaankin vain noin 60 % referenssikappaleen lujuudesta. 20 ja 30 mm:n paksuiset eristerappauslevyt, joita säilytettiin vuorokausi -5 °C:n tai -2 °C:n lämpötilassa, saatiin jälkihoidon avulla lähes referenssikappaleen lujisiksi (80...90 %). Vastaavilla kylmäsäilytyslämpötiloilla 10 mm:n laastilevyistä tuli heikompia (70 %). Lämpötilassa -10 °C säilytettyjen koe-kappaleiden lujuudet jäivät jälkihoidosta huolimatta noin 50 %:n, joten näin kylmä läm-pötila heikentää tuoretta rappauslaastia jo huomattavasti.

Rappauslaastikerroksen paksuudella oli vaikutusta kylmäsäilytyksessä olleisiin jälkihoitamattomiin koekappaleisiin. 10 mm:n paksuinen levy saavutti jäätympisteeseen paksumpia levyjä nopeammin, joten jäätyminen heikentävät vaikutukset näkyivät sel-vemmin. Ohut laastikerros kuivui paksumpia kerroksia nopeammin, joten myös pidem-pään säilynyt kosteus lisäsi paksumpien levyjen lujuutta.

5.7.4 Johtopäätökset

Rappauslaastin jäätymisvesipitoisuus jäi kokeessa huomattavasti yleisesti sallitun 6 %:n yläpuolelle. Lämpötiloissa -5 °C ja -10 °C laastin jäätyminen tapahtui välillä 7...24 h, eli laastin kovettumisreaktiot olivat päässeet jo alkuun. Kappaleessa 3.2 on mainittu 7...24 h esikovettumisaajan aiheuttavan laasteille suurimman jäätymisestä johtuvan lu-juuskadon. Lämpötilassa -10 °C lujuuskato näkyi selvästi ja jälkihoidettujen koekappa-leiden lujuus oli vain noin puolet referenssikappaleen lujuudesta. Lämpötilassa -5 °C laastin lujuus oli jälkihoidetuilla koekappaleilla kuitenkin 80...90 % referenssikappa-leen lujuudesta. Lujuuskato jäi siis pieneksi, vaikka jäätymisvesipitoisuus ja esikovet-tumisaika olivat aikaisempien kokeiden mukaan erittäin ongelmalliset laastin jäätyminen keston kannalta. Vanhoja muurauslaasteille suoritettuja koetuloksia ei siis pystytä suo-raan käyttämään nykyaikaisten, kuituvahvistettujen ja monia lisäaineita sisältävien rap-pauslaastien toimivuuden arvioimiseen.

Jälkihoidolla oli erittäin suuri merkitys hetkellisesti jäätyneen rappauslaastin lujuuteen. Jälkihoitamattoman laastin lujuus oli parhaimmillaankin vain noin 60 % referenssikappaleen lujuudesta. Myös rappauslaastikerroksen paksuudella oli vaikutusta kylmäsäilytyksessä olleiden koekappaleiden lujuuksiin, mutta kerrospaksuuden vaikutukset eivät näkyneet yhtä selvästi jälkihoidetuissa koekappaleissa.



Kuva 5.29 Kuormitettuja koekappaleita.

5.8 Suolahärmeiden vaikutus pinnoitteiden pysyvyyteen

Rappauslaasteja ei ole tehty pakkaslisäaineistettuna, koska sen tiedetään lisäävän pinnalle muodostuvan suolahärmeen määrää ja tämän on pelätty vaikuttavan pinnoitteiden pysyvyyteen. Koe vastaa käytännössä jo valmiiksi rappauslaastin pintaan syntyneen suolahärmeen päälle tehtäviä pinnoitustöitä.

Asiaa tutkittiin valmistamalla $20 \times 200 \times 375 \text{ mm}^3$ kokoisia rappauslaastilevyjä, joiden pintaan yritettiin saada syntymään eri määrät suolahärmeitä. Vain suolahärmeen määrän tuli vaikuttaa koetuloksiin, joten rappauslaastilevyistä tehtiin tasalaatuisia ja yhtä lujia. Pinnoitteiden pysyvyys saatiin selville vetokokeiden avulla. Kaikki koekappaleet pinnoitettiin 3 viikon kovettumisen jälkeen ja kuormitukset tehtiin 28 d iässä. Ennen varsinaista koesarjaa tutkittiin suolahärmeiden syntymistä veden imeytyksen ja erilaisten kylmäsäilytysten avulla. Tavoitteena oli saada 3 erilaista ja hallittua suolahärmemäärää koekappaleiden pinnalle. Kokeissa käytettiin normaalia ja pakkaslisäaineistettua *weber.vetonit UniRender* - rappauslaastia.

5.8.1 Kokeen kulku

Koekappaleet valmistettiin vesivanerisen levyn päälle 20 mm korkean suorakaiteen muotoisen vanerimuotin avulla. Laastin sekoittamisen jälkeen muotti täytettiin yläpintaan asti ja pinta tasoitettiin suorareunaisella lastalla. Tämän jälkeen laasti leikattiin irti muotin reunoista ja muotti poistettiin. Puoli tuntia kuivuttua koekappale siirrettiin kosteushuoneeseen (75 %RH) ja se kasteltiin vesisumutuksella vuorokauden ikäisenä. Jokainen koekappale pidettiin kosteushuoneessa 2 d, jonka jälkeen ne siirrettiin laborato-

rio olosuhteisiin. Tällä varmistettiin jokaisen koekappaleen yhtä suuri lujuus. Laastilevy oli helppo irrottaa alapuolisesta vesivanerista myöhemmin.

Kuvissa näkyvät koekappaleet valmistettiin lisäämällä laastieriin 2 % punaista pigmenttiä. Suolahärmeet erottuivat selvemmin punaisen laastin pinnalta, joka selkeytti koekappaleista otettuja valo- ja mikroskooppikuvia. Varsinaisen koesarjan laastilevyt tehtiin harmaasta laastista.

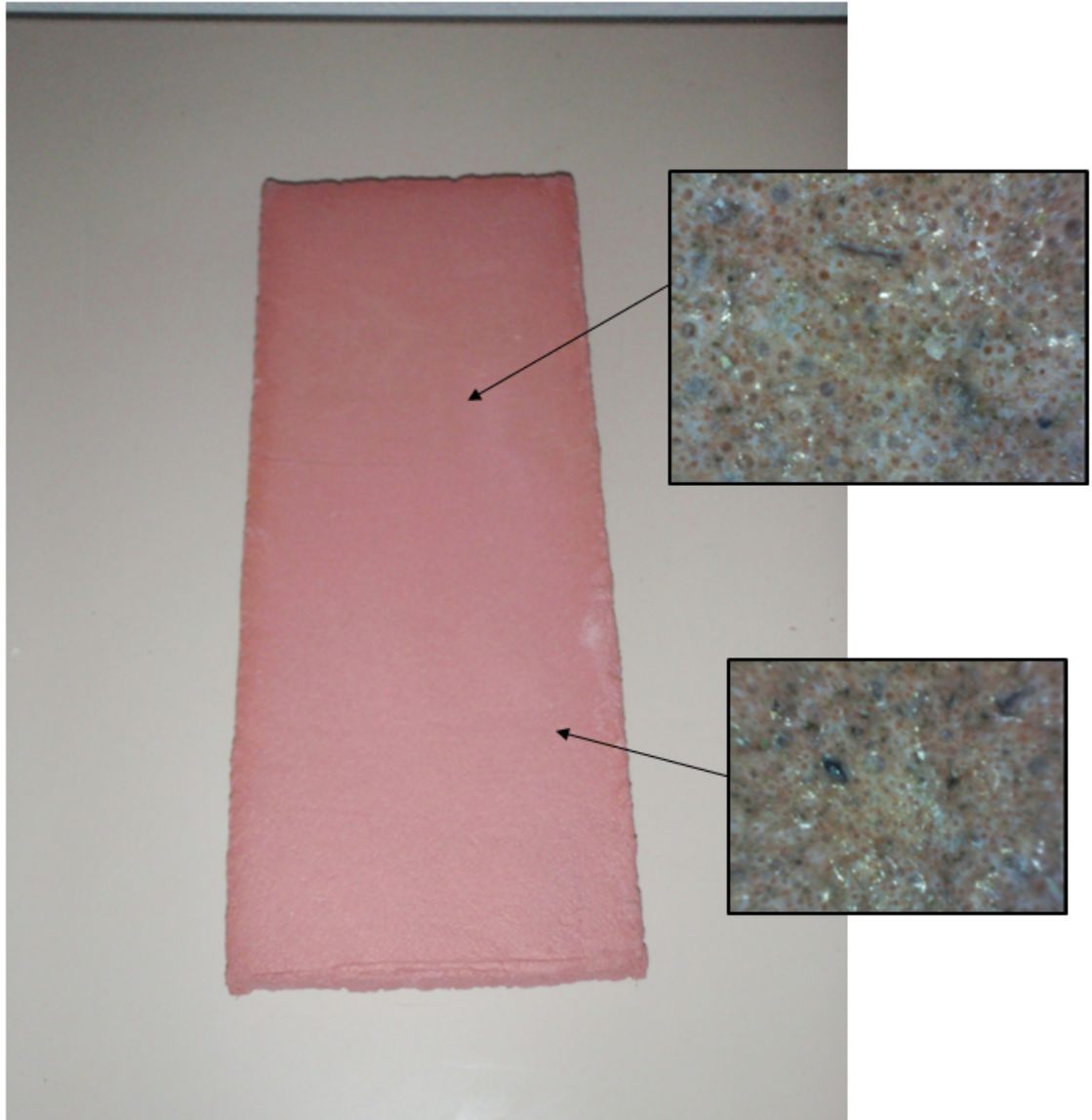
Levyt joihin ei haluttu syntyvän lainkaan suolahärmettä, valmistettiin normaalista rappauslaastista. Laastierien ominaisuudet olivat samat kuin kappaleen 5.7 kokeissa. Nämä koekappaleet pidettiin kosteana 2 d, jonka jälkeen niiden annettiin kovettua huoneenlämmössä vetokokeisiin asti.

Suolahärmeitä syntyy helpommin pakkaslisäaineistettuun laastiin, joten loput koekappaleet valmistettiin siitä. Pakkaslisäaineistettu laasti tehtiin pienemmällä vesimäärällä kuin normaali laasti. Tarkemmat laastierän tiedot olivat 480 g vettä, 4000 g kuivalaastia, ilmamäärä 27 % ja leviämä 150 mm. Jälkihoidon lisäksi koekappaleisiin imeytettiin 10 til-% vettä 7 d ikäisenä, jonka jälkeen niitä säilytettiin 0 °C:n lämpötilassa vuorokauden ajan. Laastilevyn reunat teipattiin muoviteipillä, jotta veden haihtuminen tapahtuisi tasaisesti sen yläpinnan kautta. Tällä vähennettiin suolahärmeiden epätaisaista syntymistä levyn pinnalle. Edellä mainitulla menetelmällä valmistettuihin koekappaleisiin syntyi hieman suolahärmettä ja vastaavia levyjä käytettiin myös varsinaisissa kokeissa.

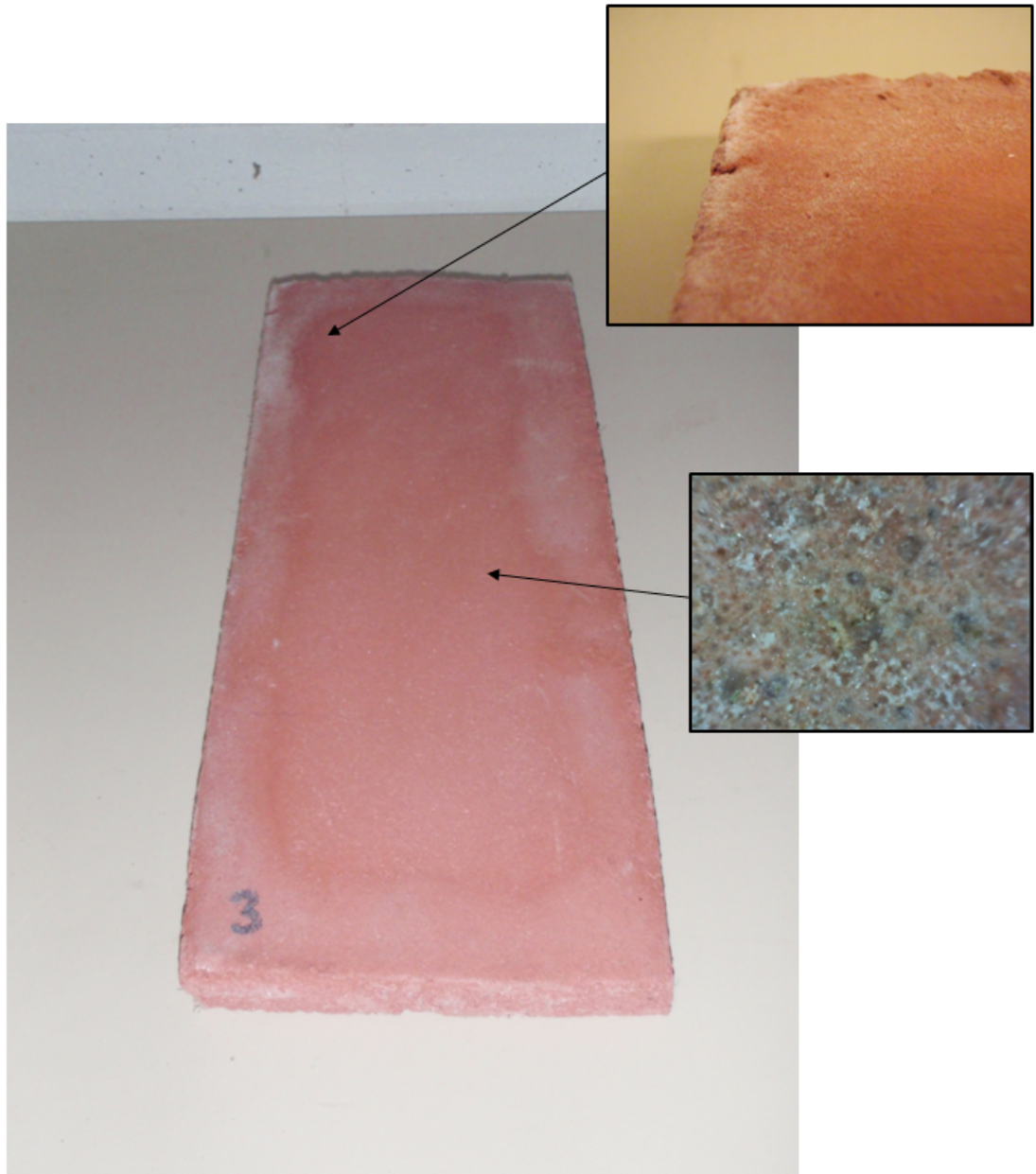
Kokeisiin tarvittiin myös laastilevyjä, joissa suolahärmeen syntyminen oli runsaampaa. Tämä saatiin aikaan imeyttämällä levyihin vielä 10 til-% vettä huoneenlämmössä siten, että vesi kulkeutui kapillaarisesti koekappaleen läpi. Vesi kaadettiin muovivastian pohjalle, josta se imeytyi laastilevyyn noin 7 d aikana ja haihtui levyn yläpinnan kautta. Koekappaleet ja niihin syntyneet suolahärmeet on esitetty kuvissa 5.31, 5.32 ja 5.33.



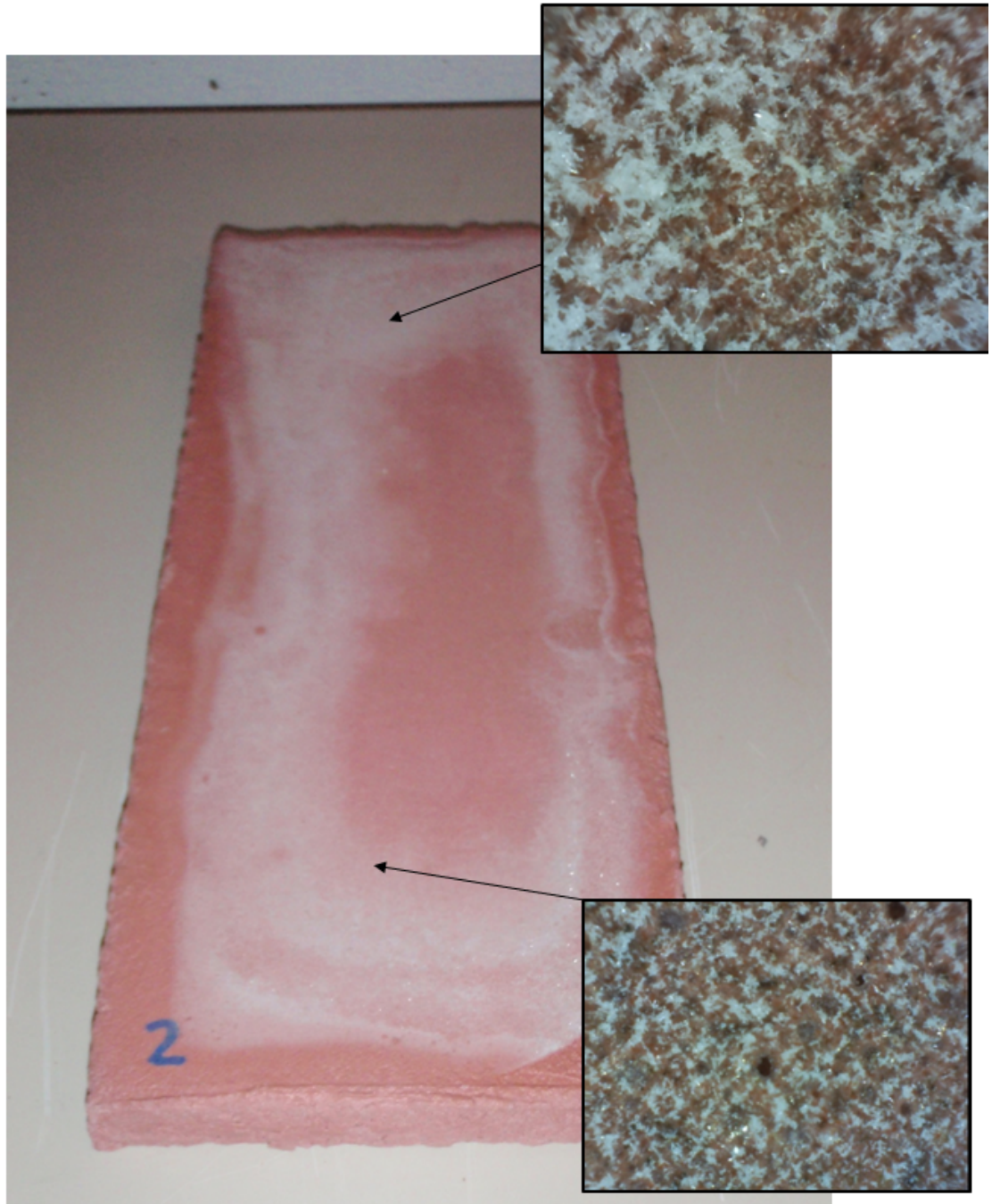
Kuva 5.30 Koekappaleita kylmäsäilytyksessä ja veden imeytystä huoneenlämmössä.



Kuva 5.31 Normaalista rappaustlaastista valmistettu koekappale. Ei suolahärmeitä. Mikroskooppikuvien suurennos 35x.



Kuva 5.32 Pakkaslisäaineistetusta rappauslaastista valmistettu koekappale, 10 til-% vettä ja vuorokauden kylmäsäilytys (0 °C). Vähän suolahärmeitä. Mikroskooppikuvan suurennos 35x.



Kuva 5.33 Pakkaslisäaineistetusta rappauslaastista valmistettu koekappale, 10 til-% vettä ja vuorokauden kylmäsäilytys (0 °C). Veden kapillaarinen imeytys (10 til-%) huoneenlämmössä. Runsaasti suolahärmeitä. Mikroskooppikuvien suurennos 35x.

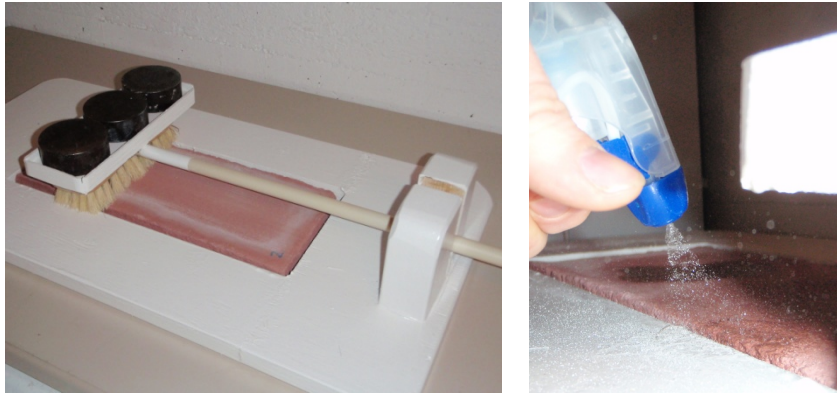
Osa koekappaleista joihin oli syntynyt suolahärmeitä, harjattiin ennen niiden pinnoittamista. Harjaus tehtiin kahdella eri menetelmällä, joiden vaikutusta suolahärmeiden määrään ja pinnoitteiden pysyvyyteen tutkittiin. Molemmat menetelmät ovat helposti työmailla toteutettavia.

Eri levyille tehtävän harjauksen tuli olla mahdollisimman identtinen, joten harjaamista varten valmistettiin yksinkertainen teline. Harja liikkui telineen avulla samaa

liikerataa pitkin ja harjan päälle asetetut punnukset ($3 \cdot 1000$ g) pitivät harjausvoiman vakiona. Koekappale pysyi paikoillaan telineen keskiosassa olevassa syvennyksessä harjaa liikuttaessa.

Ensimmäinen kokeissa käytettävä harjausmenetelmä oli kuivaharjaus. Tämä suoritettiin edellä mainitun harjaustelineen avulla $3 \cdot 1000$ g punnuksia käyttäen. Harjaa liikutettiin 2 kertaa edestakaisin tasaisella vauhdilla, jonka jälkeen irtonainen pöly poistettiin ilmapuhaltimella. Ilmapuhallin toimi vain pienellä paineella, joten se vastasi kevyen tuulen vaikutusta työmailla.

Toinen harjausmenetelmä oli vesiharjaus. Tässä menetelmässä koekappaleen pinta kasteltiin suihkupullolla ennen harjaamista. Kasteluun käytettävä vesimäärä oli jokaiselle koekappaleelle sama. Kastelun jälkeen pinta harjattiin samoin kuin kuivaharjauksessa, mutta harjaa liikutettiin edestakaisin vain kerran. Vesiharjatuille koekappaleille tehtiin vielä kevyt kuivaharjaus seuraavana päivänä, eli $2 \cdot 1000$ g punnuksien avulla kerran edestakaisin. Irtonainen pöly poistettiin ilmapuhaltimella ennen pinnoittamista. Harjausmenetelmät on esitetty kuvassa 5.34.



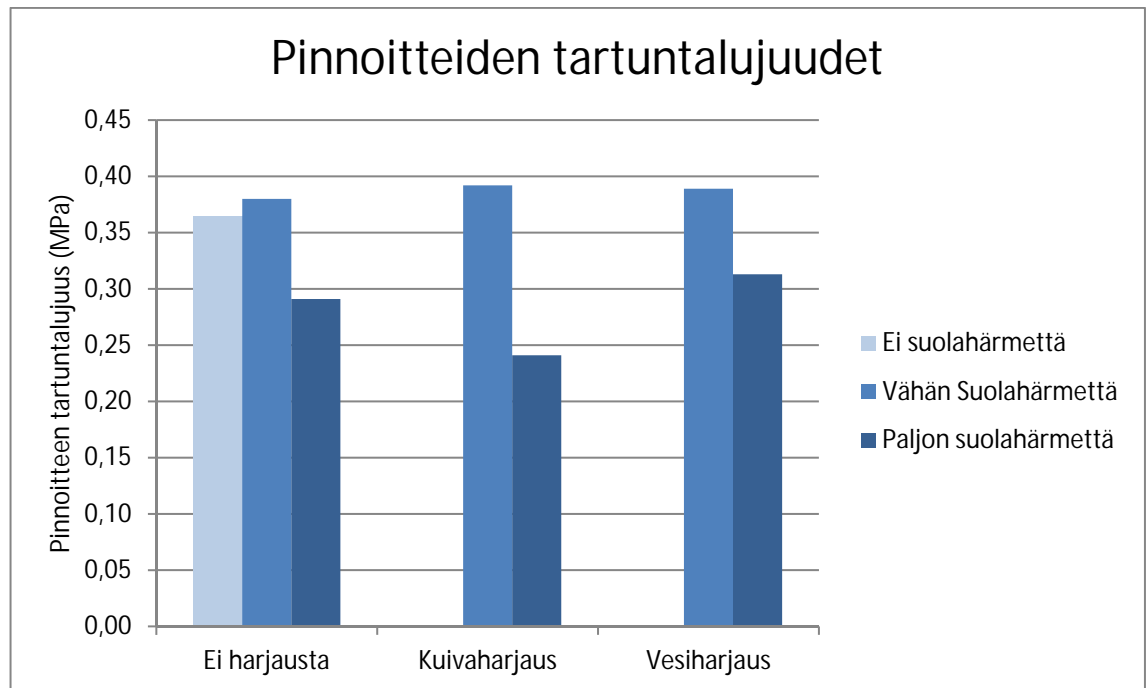
Kuva 5.34 Harjaukseen käytetty teline (vas.) ja koekappaleen kastelua vesiharjauksessa (oik.).

Pinnoitus tehtiin kaikille koekappaleille 21 d ikäisenä. Ennen pinnoittamista irtonainen pöly poistettiin ilmapuhaltimen avulla myös harjaamattomista levyistä. Pinnoitteena käytettiin *weber.wetonit SilcoMaalia* ja *weber.vetonit SilcoPinnoitetta* (raekoko 1,5 mm), joiden sideaineena toimii silikonihartsiemulsio, väriaineena epäorgaaniset pigmentit ja runkoaineena murskattu kalkkikivi sekä dolomiitti. Pinnoittaminen aloitettiin levittämällä tasainen maalikerros koekappaleen pinnalle. Maalin annettiin kuivua 24 h ennen pinnoitteen laittoja. Pinnoite levitettiin suorareunaisella lastalla voimakkaasti painaen ja pinta hierrettiin suurimpaan raekokoon asti. Pinnoitteen annettiin kuivua 7 d ennen vetokokeiden suorittamista.

Vetokokeita varten koekappaleista leikattiin kulmahiomakoneella 3 rinnakkaista vetokoepalaa, jotka liimattiin metallisten vetolevyjen väliin. Vetokoejärjestely oli sama kuin kappaleen 5.7 kokeissa, paitsi koekappaleiden murtumisen tuli tapahtua pinnoitteen ja laastin välisestä rajapinnasta.

5.8.2 Tulokset

Vetokokeilla tutkittiin suolahärmeen määrän ja harjausmenetelmän vaikutusta pinnoitteiden tartuntalujuuteen. Tulokset on esitetty kuvassa 5.35 ja taulukossa 5.8.



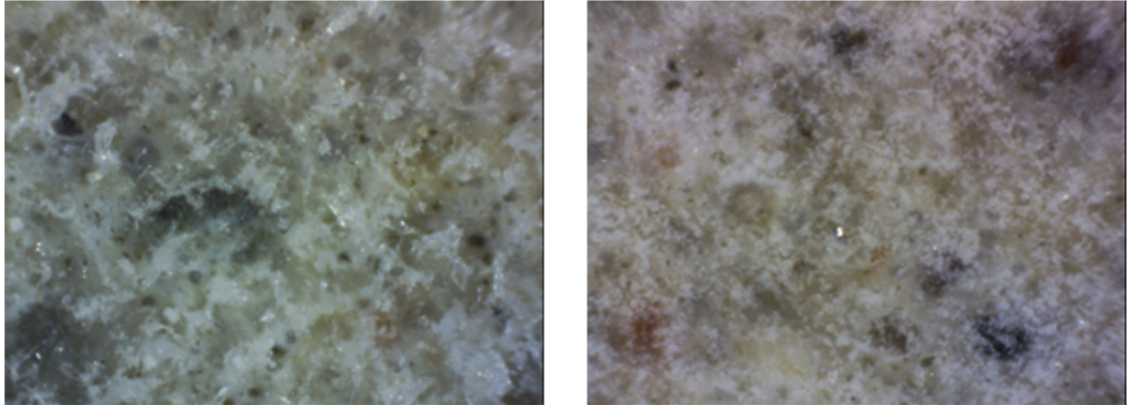
Kuva 5.35 Suolahärmeiden määrän ja harjausmenetelmän vaikutus pinnoitteiden tartuntalujuuksiin.

Laasti	Suolahärme	Harjaus	Murtovoima [N]	Tartuntalujuus [MPa]
Normaali	Ei	Ei	3293,56	0,37
Pakkas-	Vähän	Ei	3433,36	0,38
Pakkas-	Vähän	Kuivaharjaus	3533,79	0,39
Pakkas-	Vähän	Vesiharjaus	3508,5	0,39
Pakkas-	Paljon	Ei	2623,4	0,29
Pakkas-	Paljon	Kuivaharjaus	2174,46	0,24
Pakkas-	Paljon	Vesiharjaus	2821,3	0,31

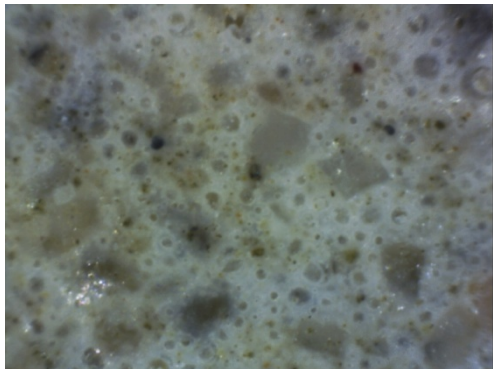
Taulukko 5.8 Suolahärmeiden määrän ja harjausmenetelmän vaikutus pinnoitteiden tartuntalujuuksiin.

Tuloksista nähdään, että pieni suolahärmeen määrä ei vaikuttanut pinnoitteen tartuntaan. Kyseisissä koekappaleissa pinnoitteen tartuntalujuus oli 0,38...0,39 MPa, kun vastaava arvo normaalista rappauslaastista valmistetuille levyille oli 0,37 MPa. Tätä tartuntalujuuden arvoa käytetään vertailuarvona myöhemmin esitettävissä tuloksissa. Kahdella eri menetelmällä suoritetuilla harjauksilla ei näyttänyt olevan vaikutusta pieneen suolahärmemäärään.

Kun suolahärmettä oli syntynyt runsaasti, pinnoitteen tartuntalujuus oli 77 % vertailu-
vosta. Pinnalle kiteytyneet suolat heikensivät tartuntaa selvästi. Näille koekappaleille
suoritettu kuivaharjaus näytti heikentävän tartuntaa entisestään, jolloin lujuus oli 63 %
vertailu-
arvosta. Mikroskooppitarkastelulla huomattiin, että kuivaharjaus vain hajotti
suurempia suolakiteitä ja levitti niitä tasaisemmin levyn pinnalle. Riittävään suolahär-
meiden poistamiseen tämä menetelmä ei soveltunut.



Kuva 3.56 Mikroskooppikuva ennen kuivaharjausta (vas.) ja kuivaharjauksen jälkeen (oik.). Suurennos 35x.



Kuva 3.57 Kasteltu koekappaleen pinta. Suurennos 35x.

Vesiharjauksella tartuntalujuutta saatiin hieman parannettua runsaan suolahärmeen tapauksessa. Kuvasta 3.57 huomataan, että suihkupullolla kastellun levyn pinnalta ei erottunut yksittäisiä suolakiteitä. Suola liukeni veteen, mutta kiteytyi taas levyn kuivuttua. Tällä harjausmenetelmällä pinnoitteiden tartuntalujuudeksi saatiin 82 % vertailu-
arvosta. Suolahärmeiden heikentävä vaikutus pinnoitteiden tartuntaan näkyi myös vesiharjauksen jälkeen.

Kaikkien yksittäisten vetokoetulosten keskihajontojen keskiarvo oli 0,04 MPa, eli hajonnat saatiin pysymään pieninä. Suurimmat keskihajonnat (0,09 MPa) ilmenivät laastilevyissä, joihin syntynyt suolahärmemäärä oli runsasta. Tämä johtuu siitä, että suolahärmeitä ei saatu syntymään täysin tasaisesti koko levyn pinta-alalle. Suolahärmeitä syntyi eniten laastilevyn reunaosiin ja tiheimmät suolakertymät näkyivät valumina koekappaleen pinnalla.



Kuva 3.58 Pakkaslisäaineen vaikutus suolahärmeen määrään.

Ennen koesarjaa oletettiin, että pakkaslisäaineistettuun laastiin syntyy enemmän suolahärmeitä. Asiaa tutkittiin tekemällä samaan aikaan koekappaleet sekä normaalista että pakkaslisäaineistetusta rappauslaastista. Molemmille koekappaleille tehtiin samanlainen käsittely, jolla saatiin vetokokeissa käytettyihin koekappaleisiin syntymään runsaasti suolahärmeitä. Veden kapillaarisen imeytyksen jälkeen nähtiin, että ero oli merkittävä. Pakkaslisäaineistetun laastin lähes koko pinta-ala oli suolahärmeiden peitossa, kun taas normaalin laastin pinnassa näkyi vain pieni valuma

levyn keskikohdassa. Samoissa olosuhteissa säilytettyjen koekappaleiden perusteella voidaan todeta, että alkuperäinen oletamus suolahärmeiden määrästä piti paikkansa. Rappauslaastiin lisättävä pakkaslisäaine lisää myös suolahärmeiden määrää. Koekappaleet on esitetty kuvassa 3.58, jossa vasemmalla puolella on normaalista laastista valmistettu ja oikealla puolella pakkaslaastista valmistettu laastilevy.

5.8.3 Johtopäätökset

Pakkaslisäaineen käyttö lisää rappauslaastin pinnalle kiteytyvän suolahärmeen määrää. Kokeissa ilmennyt suolahärme oli vesiliukoista, mutta kiteytyi uudelleen levyn kuivuesssa. Vähäinen suolahärmeen määrä ei vaikuttanut pinnoitteiden tartuntalujuuteen, mutta runsas härmeen määrä heikensi tartuntaa. Runsaan suolahärmeen päälle tehdyn pinnoitteen tartuntalujuus oli 77 % vertailukappaleen päälle tehtyyn pinnoitteeseen verrattuna. Kuivaharjauksen jälkeen pinnoitteen tartuntalujuus oli 63 % vertailuarvosta, joten kuivaharjaus ei soveltunut kokeessa syntyneiden suolahärmeiden poistoon. Vesiharjauksen jälkeen tartuntalujuus oli 82 % vertailuarvosta, eli vesiharjauksella tartunta parani vain vähän.

Työmailla on todettu suolahärmeiden vaikuttavan pinnoitteiden tartuntaan merkittävämmän, kuin koetulokset osoittivat. Kokeessa tartuntalujuus oli huonoimmillaankin 0,24 MPa, kun työmailla on todettu suolahärmeiden pahimmillaan irrottavan pinnoitteita kokonaan. Työmailla ilmenevät ongelmat voivat johtua pinnoittamisen jälkeen kiteytyvistä suoloista, jotka aiheuttavat kiteytyessään painetta pinnoitteen ja laastin väliin. Paineen kasvaessa tartuntalujuutta suuremmaksi voi pinnoite irrota kokonaan alapuolisesta laastista. Kokeessa käytettyihin kappaleisiin ei suolahärmeitä synty-



Kuva 3.59 Pinnoitettuja veto-koekappaleita.

nyt enää pinnoittamisen jälkeen. Käytännön kohteissa laastin kastuminen voi aiheuttaa suolojen liukenemista ja kulkeutumista pinnoitteen alapuolelle, joten pakkaslisäainetta sisältävän laastikerroksen kastuminen tulisi estää pinnoittamisen jälkeen kokonaan. Tämä voi kuitenkin olla käytännön kohteissa erittäin vaikeaa, joten asia vaatii lisäselvitystä. Vastaavat koesarjat tulisi suorittaa myös siten, että laasti pääsee kastumaan pinnoittamisen jälkeen.

LÄHTEET

- [1] Dührkop H., Saretok V., Sneck T. & Svedsen S.D. Laasti, muuraus, rappaus. Helsinki 1966. Rakentajain kustannus Oy
- [2] BY 46. Rappauskirja 2005. Suomen Betoniyhdistys r.y. 158 s.
- [3] SFS-EN 197-1. Sementti. Osa 1. Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimuksenmukaisuus. 2012
- [4] Laine, Asko. Pientalon talvimuuraus. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 1981. 92s.
- [5] Knauf. Laastit ja lattiamassat – manuaali 2012. www.knauf.fi. 139 s.
- [6] Saint-Gobain Weber Oy Ab. Weber opas 2012. www.e-weber.fi. 406 s.
- [7] Internet: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parainen_kalkkilouhos.JPG. 2013
- [8] Bayer R. & Lutz H. Article: Dry mortar's from Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Electronic release, Wiley-VCH. Weinheim 2003. 17 s.
- [9] Huhtiniemi Seppo & Knuutila Ilkka. Muuraus-, laatoitus- ja rappaukset. 1993. Alfamer Oy. 192 s.
- [10] VTT Tiedotteita 2214. Kerrostalon muuraus ja rappaukset talvella. Espoo 2003. 80 s.
- [11] Liikennevirasto. Yleiset laatuvaatimukset. 1.201 Polymeerit sillankorjausmateriaalina. 1990. 17 s.
- [12] Fescon. Tuoteseloste: Fescoterm liimalaasti, talvi. 2009. 2 s.
- [13] Caparol. Tuoteseloste: CarboNit. 2012. 4 s.
- [14] RIL 103b. Teräsbetonirakenteiden suunnittelu. Osa 1. Helsinki 1975.
- [15] Kanko T. Käsikirjoitus talvimuurauksesta. VTT. 1980.
- [17] Kanko T. Talviolosuhteiden vaikutus muurauksen onnistumiseen. VTT. 1980. 35 s.

- [18] Sneck, T., Kinnunen L. & Koski L. Laastit talviolosuhteissa. Otaniemi 1965. VTT Rakennusteknillinen laboratorio. Moniste 58 s.
- [19] Sneck, Koski, Oinonen, Svedsen, Waldum, Duhrkop & Helanser: Winter masonry. VTT. 1972.
- [20] SFS-EN 1996-2 Eurokoodi 6: Muurattujen rakenteiden suunnittelu. Osa 2: Muuratun rakenteen materiaalien valinta ja työsuoritus.
- [21] Internet: <http://www.e-weber.fi>. Tuoteseloste: weber.vetonit ML 5. 2013.

LIITE 1. LABORATORIOKOKKEIDEN TULOKSIA

Taulukko 6.1. Laastin lujuudenkehitys eri lämpötiloissa. Normaali laasti (A).

Säilytyslämpötila (°C)	Säilytysaika (d)	Yksittäiset arvot:			Kosteus (%)	Yksittäiset arvot:			Puristuslujuus (MPa)
HL	0	11,1 %	11,1 %	11,1 %	11,10 %	0,00	0,00	0,00	0
	2	7,19 %	7,64 %	7,14 %	7,32 %	2,62	2,42	2,61	2,55
	7	2,02 %	1,85 %	1,94 %	1,94 %	6,40	6,60	6,50	6,5
	28	1,32 %	1,47 %	1,60 %	1,46 %	7,16	6,73	6,96	6,95
0	0	11,1 %	11,1 %	11,1 %	11,10 %	0,00	0,00	0,00	0
	2	9,66 %	9,76 %	9,74 %	9,72 %	0,00	0,00	0,00	0
	7	8,44 %	8,47 %	8,24 %	8,38 %	2,69	2,70	2,73	2,71
	28	5,03 %	5,94 %	5,75 %	5,57 %	8,24	7,95	8,43	8,21
5	0	11,1 %	11,1 %	11,1 %	11,10 %	0,00	0,00	0,00	0
	2	9,88 %	9,82 %	9,76 %	9,82 %	0,35	0,33	0,32	0,33
	7	7,26 %	7,14 %	7,34 %	7,25 %	3,00	2,72	2,97	2,90
	28	2,27 %	2,37 %	2,29 %	2,31 %	7,57	7,30	7,30	7,39
10	0	11,1 %	11,1 %	11,1 %	11,10 %	0,00	0,00	0,00	0
	2	9,61 %	9,37 %	9,21 %	9,40 %	0,59	0,44	0,40	0,48
	7	7,43 %	7,35 %	6,84 %	7,20 %	3,49	3,22	2,96	3,22
	28	3,07 %	3,11 %	3,09 %	3,09 %	7,04	6,98	6,20	6,74
0 ja HL	28+28	1,66 %	1,67 %	1,74 %	1,69 %	6,64	8,30	7,40	7,45
	28+56	1,49 %	1,50 %	1,42 %	1,47 %	7,80	7,80	8,64	8,08

Taulukko 6.2. Laastin lujuudenkehitys eri lämpötiloissa. Jäykempi pakkaslaasti (B).

Säilytyslämpötila (°C)	Säilytysaika (d)	Yksittäiset tulokset:			Kosteus (%)	Yksittäiset tulokset:			Puristuslujuus (MPa)
HL	0	8,60 %	8,60 %	8,60 %	8,60 %	0,00	0,00	0,00	0
	2	5,48 %	5,68 %	5,66 %	5,61 %	8,43	7,98	8,09	8,17
	7	4,94 %	4,99 %	4,93 %	4,95 %	11,2	11,5	11	11,23
	28	2,89 %	2,82 %	2,80 %	2,84 %	12,91	14,07	13,58	13,52
	56	2,84 %	2,71 %	2,70 %	2,75 %	17,11	16,89	17,21	17,07
0	0	8,60 %	8,60 %	8,60 %	8,60 %	0	0	0	0
	2	7,43 %	7,40 %	7,35 %	7,79 %	0,751	0,687	0,663	0,7
	7	6,72 %	6,77 %	6,85 %	6,78 %	6,8	6,62	6,71	6,71
	28	7,53 %	7,54 %	7,77 %	7,61 %	12,61	12,05	11,93	12,20
-5	0	8,60 %	8,60 %	8,60 %	8,60 %	0	0	0	0
	2	7,25 %	7,28 %	7,26 %	7,26 %	0,54	0,49	0,53	0,52
	7	6,96 %	7,03 %	6,98 %	6,99 %	4,38	4,06	4,08	4,17
	28	6,43 %	6,33 %	6,56 %	6,44 %	13,4	13,9	14,4	13,90
-15	0	8,60 %	8,60 %	8,60 %	8,60 %	0	0	0	0
	2	7,74 %	7,74 %	7,86 %	7,78 %	0	0	0	0
	7	7,65 %	7,65 %	7,64 %	7,65 %	1,34	1,41	1,39	1,38
	28	6,84 %	6,87 %	6,82 %	6,84 %	6,98	7,2	7,9	7,36
-15 ja HL	28+28	2,60 %	2,66 %	2,74 %	2,67 %	13,58	12,11	11,33	12,34
	28+56	2,40 %	2,47 %	2,46 %	2,44 %	11,68	11,25	12,13	11,69

Taulukko 6.3. Laastin lujuudenkehitys eri lämpötiloissa. Notkeampi pakkaslaasti (B).

Säilytyslämpötila (°C)	Säilytysaika(d)	Yksittäiset tulokset:			Kosteus (%):	Yksittäiset tulokset:			Puristuslujuus (MPa)
HL	0	10,31 %	10,31 %	10,31 %	10,31 %	0,00	0,00	0,00	0
	2	7,52 %	7,57 %	7,53 %	7,54 %	2,48	2,1	2,12	2,23
	7	6,04 %	6,13 %	6,13 %	6,10 %	5,09	4,25	4,95	4,76
	28	1,84 %	1,99 %	1,99 %	1,94 %	9,08	9,09	9,08	9,08
0	0	10,31 %	10,31 %	10,31 %	10,31 %	0	0	0	0
	2	9,81 %	9,80 %	9,77 %	9,79 %	0,54	0,53	0,45	0,5
	7	9,61 %	9,56 %	9,55 %	9,57 %	2,17	2,19	2,19	2,2
	28	8,49 %	8,44 %	8,00 %	8,31 %	6,14	5,03	5,14	5,4
-5	0	10,31 %	10,31 %	10,31 %	10,31 %	0	0	0	0
	2	9,54 %	9,58 %	9,49 %	9,54 %	0	0	0	0
	7	9,29 %	9,46 %	9,49 %	9,41 %	1,32	1,27	1,18	1,26
	28	7,11 %	7,17 %	7,31 %	7,20 %	7,74	7,11	7,27	7,37
-15	0	10,31 %	10,31 %	10,31 %	10,31 %	0	0	0	0
	2	9,85 %	9,80 %	9,92 %	9,86 %	0	0	0	0
	7	10,01 %	10,02 %	9,54 %	9,86 %	0,79	0,64	0,75	0,73
	28	8,56 %	8,54 %	8,62 %	8,57 %	3,32	3,13	3,25	3,23
-15 ja HL	28+28	1,18 %	1,16 %	1,20 %	1,18 %	6,62	6,4	6,12	6,38
	28+56	0,96 %	0,99 %	0,92 %	0,96 %	6,03	6,12	6,28	6,14

Taulukko 6.4. Laastin jäätymisvesipitoisuuden vaikutus tartuntalujuuteen. Kuivat tiilet (A). Siniset solut jälkihoidettuja koekappaleita.

Kosteudet:					
	Lämpötila:	Tiili:	Laasti:	Lujuus (MPa):	Max voima (N):
Keskiarvo:	20	0 %	5,40 %	0,074	736
	20	0 %	5,20 %	0,069	689
	20	0 %	5,40 %	0,080	802
	20	0 %	5,3 %	0,074	742,3
	20	0 %	4,90 %	0,063	628
Keskiarvo:	20	0 %	5,20 %	0,082	823
	20	0 %	5,00 %	0,106	1061
	20	0 %	5,0 %	0,084	837,3
	0	0 %	4,60 %	0,061	609
	0	0 %	4,70 %	0,028	276
Keskiarvo:	0	0 %	4,40 %	0,081	813
	0	0 %	4,6 %	0,057	566,0
	0	0 %	4,00 %	0,063	632
	0	0 %	4,10 %	0,076	755
	0	0 %	4,30 %	0,097	965
Keskiarvo:	0	0 %	4,1 %	0,078	784,0
	-2	0 %	4,60 %	0,052	523
	-2	0 %	4,50 %	0,025	249
	-2	0 %	4,40 %	0,091	908
	-2	0 %	4,5 %	0,056	560,0
Keskiarvo:	-2	0 %	4,60 %	0,064	635
	-2	0 %	4,10 %	0,069	692
	-2	0 %	4,40 %	0,077	766
	-2	0 %	4,4 %	0,070	697,7
	-5	0 %	4,40 %	0,089	889
Keskiarvo:	-5	0 %	4,20 %	0,072	720
	-5	0 %	4,60 %	0,067	674
	-5	0 %	4,4 %	0,076	761,0
	-5	0 %	4,40 %	0,060	595
	-5	0 %	4,30 %	0,053	529
Keskiarvo:	-5	0 %	4,40 %	0,076	759
	-5	0 %	4,4 %	0,063	627,7
	-10	0 %	5,20 %	0,075	745
	-10	0 %	5,30 %	0,056	557
	-10	0 %	5,40 %	0,056	564
Keskiarvo:	-10	0 %	5,3 %	0,062	622,0
	-10	0 %	4,90 %	0,099	986
	-10	0 %	4,70 %	0,078	782
	-10	0 %	4,80 %	0,076	762
	-10	0 %	4,8 %	0,084	843,3

Taulukko 6.5. Laastin jäätymisvesipitoisuuden vaikutus tartuntalujuuteen. Kosteat tiilet (B). Siniset solut jälkihoidettuja koekappaleita.

Kosteudet:					
	Lämpötila:	Tiili:	Laasti:	Lujuus (Mpa):	Max voima (N):
Keskiarvo:	20	5,6 %	5,1 %	0,062	620
	20	5,6 %	5,3 %	0,057	569
	20	5,5 %	5,4 %	0,080	803
	20	5,6 %	5,3 %	0,066	664,0
	20	5,7 %	5,1 %	0,076	758
Keskiarvo:	20	5,6 %	5,3 %	0,122	1220
	20	5,4 %	5,4 %	0,075	752
	20	5,6 %	5,3 %	0,091	910,0
	0	5,6 %	5,4 %	0,089	885
	0	5,4 %	5,6 %	0,095	952
Keskiarvo:	0	5,5 %	5,8 %	0,162	1616
	0	5,5 %	5,6 %	0,115	1151,0
	0	5,6 %	5,3 %	0,132	1318
	0	5,7 %	5,1 %	0,113	1125
	0	5,2 %	5,8 %	0,145	1452
Keskiarvo:	0	5,5 %	5,4 %	0,130	1298,3
	-2	5,7 %	5,4 %	0,091	911
	-2	5,7 %	5,5 %	0,061	614
	-2	5,8 %	6,5 %	0,082	818
	-2	5,7 %	5,8 %	0,078	781,0
Keskiarvo:	-2	5,5 %	5,0 %	0,089	886
	-2	5,5 %	5,1 %	0,122	1222
	-2	6,0 %	5,7 %	0,100	998
	-2	5,7 %	5,3 %	0,104	1035,3
	-5	5,5 %	5,1 %	0,059	587
Keskiarvo:	-5	5,5 %	5,3 %	0,083	828
	-5	5,6 %	5,4 %	0,100	995
	-5	5,5 %	5,3 %	0,080	803,3
	-5	5,5 %	5,6 %	0,064	641
	-5	5,6 %	5,9 %	0,113	1127
Keskiarvo:	-5	5,4 %	5,5 %	0,141	1410
	-5	5,5 %	5,7 %	0,106	1059,3
	-10	6,0 %	5,7 %	0,054	543
	-10	5,7 %	6,3 %	0,072	720
	-10	5,5 %	6,1 %	0,068	676
Keskiarvo:	-10	5,8 %	6,0 %	0,065	646,3
	-10	5,9 %	4,9 %	0,113	1133
	-10	5,6 %	5,1 %	0,079	786
	-10	5,9 %	6,3 %	0,145	1445
	-10	5,8 %	5,4 %	0,112	1121,3

Taulukko 6.6. Laastin jäätymisvesipitoisuuden vaikutus tartuntalujuuteen. Märät tiilet (C). Siniset solut jälkihoidettuja koekappaleita.

Kosteudet:					
	Lämpötila:	Tiili:	Laasti:	Lujuus (Mpa):	Max voima (N):
Keskiarvo:	20	9,5 %	9,4 %	0,158	1575
	20	9,3 %	9,4 %	0,123	1228
	20	9,8 %	9,6 %	0,150	1499
	20	9,5 %	9,5 %	0,143	1434,0
	20	10,2 %	9,1 %	0,219	2186
Keskiarvo:	20	9,8 %	9,1 %	0,181	1811
	20	9,5 %	9,3 %	0,223	2231
	20	9,8 %	9,2 %	0,208	2076,0
	0	9,9 %	9,5 %	0,256	2556
	0	9,9 %	9,6 %	0,226	2258
Keskiarvo:	0	10,0 %	9,8 %	0,251	2509
	0	9,9 %	9,6 %	0,244	2441,0
	0	9,4 %	9,3 %	0,268	2679,4
	0	9,3 %	9,4 %	0,294	2940
	0	8,8 %	9,4 %	0,283	2832
Keskiarvo:	0	9,2 %	9,3 %	0,282	2817,1
	-2	9,7 %	9,5 %	0,193	1929
	-2	10,2 %	9,5 %	0,169	1687
	-2	9,8 %	9,5 %	0,136	1363
	-2	9,9 %	9,5 %	0,166	1659,7
Keskiarvo:	-2	9,5 %	9,8 %	0,234	2340
	-2	9,7 %	9,3 %	0,293	2931
	-2	9,4 %	9,4 %	0,231	2309
	-2	9,5 %	9,5 %	0,253	2526,7
	-5	9,7 %	9,5 %	0,059	593
Keskiarvo:	-5	10,2 %	9,5 %	0,063	631
	-5	9,8 %	9,5 %	0,110	1104
	-5	9,9 %	9,5 %	0,078	776,0
	-5	10,5 %	9,3 %	0,206	2063
	-5	10,2 %	9,6 %	0,208	2081
Keskiarvo:	-5	9,8 %	9,7 %	0,142	1423
	-5	10,2 %	9,5 %	0,186	1855,7
	-10	9,7 %	9,6 %	0,035	352
	-10	9,8 %	9,4 %	0,045	451
	-10	9,3 %	9,5 %	0,061	610
Keskiarvo:	-10	9,6 %	9,5 %	0,047	471,0
	-10	9,5 %	8,5 %	0,127	1273
	-10	9,7 %	8,6 %	0,122	1221
	-10	9,4 %	9,1 %	0,122	1223
	-10	9,5 %	8,7 %	0,124	1239,0